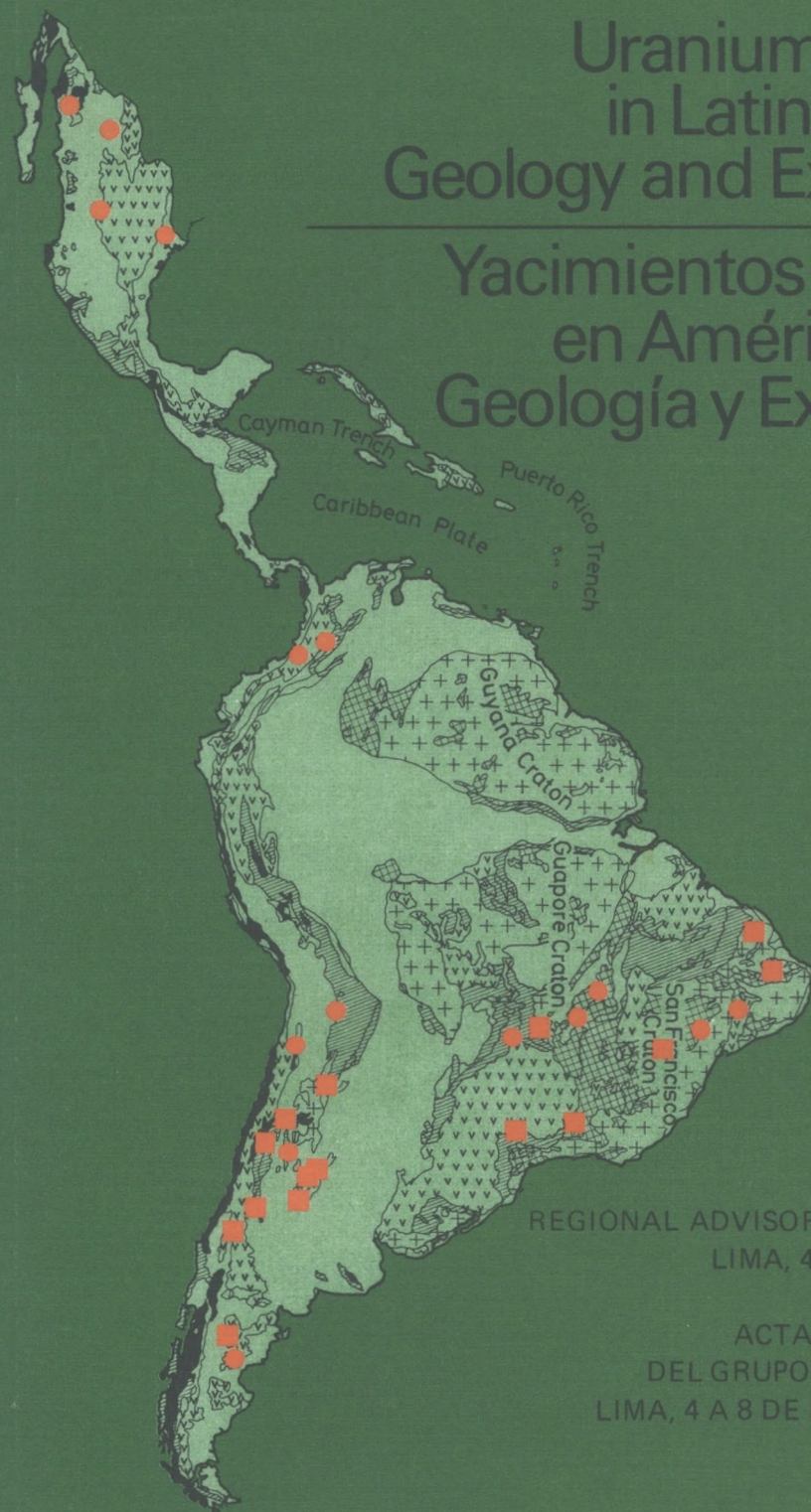


# Uranium Deposits in Latin America: Geology and Exploration

## Yacimientos de Uranio en América Latina: Geología y Exploración



PROCEEDINGS OF A  
REGIONAL ADVISORY GROUP MEETING  
LIMA, 4-8 DECEMBER 1978

ACTAS DE UNA REUNION  
DEL GRUPO ASESOR REGIONAL  
LIMA, 4 A 8 DE DICIEMBRE DE 1978



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 1981  
ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATOMICA, VIENA, 1981

The front cover shows the uranium deposits (■) and major occurrences (●) in Latin America.

The back cover shows the Poços de Caldas Uranium Mine, Brazil (provided by courtesy of Nuclebrás).

La cubierta anterior muestra los yacimientos (■) y principales manifestaciones (●) de uranio en América Latina.

La cubierta posterior muestra la mina de uranio de Poços de Caldas, Brasil (fotografía amablemente facilitada por Nuclebrás).

**URANIUM DEPOSITS IN LATIN AMERICA:  
GEOLOGY AND EXPLORATION**

**YACIMIENTOS DE URANIO EN AMERICA LATINA:  
GEOLOGIA Y EXPLORACION**

The following States are Members of the International Atomic Energy Agency:

AFGHANISTAN	HOLY SEE	PHILIPPINES
ALBANIA	HUNGARY	POLAND
ALGERIA	ICELAND	PORTUGAL
ARGENTINA	INDIA	QATAR
AUSTRALIA	INDONESIA	ROMANIA
AUSTRIA	IRAN	SAUDI ARABIA
BANGLADESH	IRAQ	SENEGAL
BELGIUM	IRELAND	SIERRA LEONE
BOLIVIA	ISRAEL	SINGAPORE
BRAZIL	ITALY	SOUTH AFRICA
BULGARIA	IVORY COAST	SPAIN
BURMA	JAMAICA	SRI LANKA
BYELORUSSIAN SOVIET SOCIALIST REPUBLIC	JAPAN	SUDAN
CANADA	JORDAN	SWEDEN
CHILE	KENYA	SWITZERLAND
COLOMBIA	KOREA, REPUBLIC OF	SYRIAN ARAB REPUBLIC
COSTA RICA	KUWAIT	THAILAND
CUBA	LEBANON	TUNISIA
CYPRUS	LIBERIA	TURKEY
CZECHOSLOVAKIA	LIBYAN ARAB JAMAHIRIYA	UGANDA
DEMOCRATIC KAMPUCHEA	LIECHTENSTEIN	UKRAINIAN SOVIET SOCIALIST REPUBLIC
DEMOCRATIC PEOPLE'S REPUBLIC OF KOREA	LUXEMBOURG	UNION OF SOVIET SOCIALIST REPUBLICS
DENMARK	MADAGASCAR	UNITED ARAB EMIRATES
DOMINICAN REPUBLIC	MALAYSIA	UNITED KINGDOM OF GREAT BRITAIN AND NORTHERN IRELAND
ECUADOR	MALI	UNITED REPUBLIC OF CAMEROON
EGYPT	MAURITIUS	UNITED REPUBLIC OF TANZANIA
EL SALVADOR	MEXICO	UNITED STATES OF AMERICA
ETHIOPIA	MONACO	URUGUAY
FINLAND	MONGOLIA	VENEZUELA
FRANCE	MOROCCO	VIET NAM
GABON	NETHERLANDS	YUGOSLAVIA
GERMAN DEMOCRATIC REPUBLIC	NEW ZEALAND	ZAIRE
GERMANY, FEDERAL REPUBLIC OF	NICARAGUA	ZAMBIA
GHANA	NIGER	
GREECE	NIGERIA	
GUATEMALA	NORWAY	
HAITI	PAKISTAN	
	PANAMA	
	PARAGUAY	
	PERU	

The Agency's Statute was approved on 23 October 1956 by the Conference on the Statute of the IAEA held at United Nations Headquarters, New York; it entered into force on 29 July 1957. The Headquarters of the Agency are situated in Vienna. Its principal objective is "to accelerate and enlarge the contribution of atomic energy to peace, health and prosperity throughout the world".

© IAEA, 1981

Permission to reproduce or translate the information contained in this publication may be obtained by writing to the International Atomic Energy Agency, Wagramerstrasse 5, P.O. Box 100, A-1400 Vienna, Austria.

Printed by the IAEA in Austria  
February 1981

**PANEL PROCEEDINGS SERIES**  
**COLECCION DE ACTAS DE GRUPOS DE EXPERTOS**

**URANIUM DEPOSITS  
IN LATIN AMERICA:  
GEOLOGY AND EXPLORATION**

PROCEEDINGS OF A REGIONAL ADVISORY GROUP MEETING  
ORGANIZED BY THE INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY  
AND HELD IN LIMA, PERU, FROM 4 TO 8 DECEMBER 1978

**YACIMIENTOS DE URANIO  
EN AMERICA LATINA:  
GEOLOGIA Y EXPLORACION**

ACTAS DE UNA REUNION DEL GRUPO ASESOR REGIONAL  
ORGANIZADA POR EL  
ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
Y CELEBRADA EN LIMA, PERU, DEL 4 AL 8 DE DICIEMBRE DE 1978

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA  
ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATOMICA, VIENA

1981

URANIUM DEPOSITS IN LATIN AMERICA: GEOLOGY AND EXPLORATION  
YACIMIENTOS DE URANIO EN AMERICA LATINA:  
GEOLOGIA Y EXPLORACION  
IAEA, VIENNA, 1981  
STI/PUB/505  
ISBN 92-0-041081-2

## FOREWORD

The South American continent covers an area of 17 800 000 km<sup>2</sup> containing extensive, favourable lithologic and tectonic environments for uranium mineralization. Indeed large old cratonic areas such as the Guiana, Guaporé, and S. Francisco Massifs with rocks 3100 to 1800 million years old are associated with metamorphic belts and suitable sedimentary stratigraphic sequences. In addition to the geochronological setting and the presence of mobile tectonic belts, palaeozoic and mesozoic orogenies accompanied by granitic intrusions and extensive volcanic activity make the South American continent one of the world's most interesting areas for uranium exploration. A recent study of the world's uranium resources indicated a speculative potential of 0.7 to 1.9 million tonnes uranium for the South American continent.

A decade ago only a few countries were prospecting for uranium in South America, with a limited budget. At present every country is active in uranium exploration and, since 1976, an estimated total of 50 million dollars/year is being invested in exploration by national and joint-venture efforts. These exploration efforts are being rewarded by the identification of sizeable uranium resources. The Reasonably Assured Resources reported for the region by the IAEA/NEA Working Party on Uranium Resources, Production and Demand for 1975, 1977 and 1979 are respectively: 19 000, 35 000 and 86 000 tonnes uranium. The Estimated Additional Resources in the same cost category of US \$80/kg U is 67 000 tonnes uranium for 1979.

Uranium has been identified in a variety of geological environments. In fact, excluding calcretes, all classical types of uranium deposits are now known in South America: Precambrian quartz pebble conglomerate (Gandarela and Serra das Gairotas — Brazil); vein and disseminated type deposits and occurrences related to igneous activity (Poços de Caldas, Lagoa Real — Brazil, several areas in Argentina and Los Frailes district in Bolivia); deposits in sedimentary rocks (Mendoza, Jujuy and Salta-Argentina, Figueira — Brazil) including typical roll front structures (Amorirópolis — Brazil); deposits in association with carbonitites (Cerro Cora — Paraguay, Araxá — Brazil); and low-grade dissemination in episyenites and associated rock (Espinharas and Itataia — Brazil). Uranium also occurs associated with secondary copper mineralization in Chile (Chuquicamata) and with phosphates in Brazil (Olinda).

In view of the great interest of the Member States of the region in the subject, the IAEA organized this Advisory Group Meeting with the objective of bringing together geologists involved in uranium exploration in the region for

a more comprehensive discussion and to share their experience with their neighbours. It was gratifying to see that all countries in South America were represented plus a large number of consumer and producer countries which are operating in the region, bringing the total attendance to 145 participants.

The proceedings of the meeting consists of 30 written contributions and their discussion plus the reports of three working groups. They present a great wealth of new geological models, favourability studies and information on uranium resources. For the convenience of the reader this information was grouped according to content, under five headings: (a) Geochronological and Tectonic Evolution of the South American Continent and its Uranium Potential; (b) Exploration Techniques Applicable to the South American Environments; (c) Preliminary Reconnaissance and Regional Favourability Studies; (d) Uraniferous Mineralizations; Geology and Mine Development; (e) Recovery of Uranium as a By-Product of other Mining Operations.

The Agency is grateful to all experts who took part in the Advisory Group Meeting, especially to those who contributed papers, took part in the discussion and chaired the Working Groups, for their help in preparing the reports. Finally, sincere gratitude is expressed for the excellent conference arrangements and the generous hospitality to the participants and Agency staff afforded by the Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).

## **PREFACIO**

El Continente Sudamericano, con una superficie de 17 800 000 km<sup>2</sup>, encierra extensos ambientes litológicos y tectónicos favorables a la mineralización del uranio. En efecto, hay grandes zonas cratónicas viejas, por ejemplo la Guayana, Guaporé y los macizos de San Francisco, con rocas de 3100 a 1800 millones de años de edad, asociadas a franjas metamórficas y secuencias estratigráficas sedimentarias favorables. Además del encuadre geocronológico y de la presencia de franjas tectónicas móviles, las orogenias paleozoicas y mesozoicas acompañadas de intrusiones graníticas y una extensa actividad volcánica hacen del Continente Sudamericano una de las zonas más interesantes del mundo para la exploración de uranio. Un reciente estudio de los recursos uraníferos mundiales indicaba un potencial hipotético de 0,7 a 1,9 millones de toneladas de uranio en este Continente.

Hace diez años, solo unos pocos países realizaban prospecciones de uranio en Sudamérica, con un presupuesto reducido. Actualmente, en todos los países se ejecutan activas exploraciones y, desde 1976, se calcula que se viene invirtiendo un total de 50 millones dólares/año en búsquedas realizadas por empresas nacionales y mixtas. Estos trabajos están siendo recompensados por el descubrimiento de importantes recursos uraníferos. Los recursos razonablemente

seguros de la región, indicados en el informe del Grupo de trabajo OIEA/AEN sobre recursos, producción y demanda de uranio, para 1975, 1977 y 1979 son, respectivamente: 19 000, 35 000 y 86 000 toneladas de uranio. Los recursos adicionales estimados, en la misma categoría de costes de dóls. 80/kg U, son de 67 000 toneladas para 1979.

Se ha descubierto uranio en toda una variedad de ambientes geológicos. En realidad, con exclusión de los caliches, en Sudamérica se conocen hoy día todos los tipos clásicos de yacimientos uraníferos: conglomerados de guijarros de cuarzo precámbricos (Gandarela y Serra das Gairotas — Brasil); yacimientos filonianos y de tipo diseminado, y manifestaciones asociadas a la actividad ígnea (Poços de Caldas, Lagoa Real — Brasil, diversas zonas de Argentina y distrito de Los Frailes en Bolivia); yacimientos en rocas sedimentarias (Mendoza, Jujuy y Salta-Argentina, Figueira — Brasil) inclusive estructuras típicas de frente ondulado (Amorirópolis — Brasil); yacimientos en asociación con carbonititas (Cerro Corá — Paraguay, Araxá — Brasil); y diseminación de mineral de baja ley en episienitas y rocas asociadas (Espinharas e Itataia — Brasil). El uranio se presenta también asociado a una mineralización secundaria de cobre en Chile (Chuquicamata) y fosfatos en Brasil (Olinda).

En vista del gran interés de los Estados Miembros de la región por esta cuestión, el OIEA organizó esta reunión de Grupo Asesor con el fin de poner en contacto a geólogos dedicados a la exploración de uranio en dicha región, para que puedan mantener conversaciones más detenidas y compartir su experiencia con los vecinos. Fue grato observar que todos los países de América del Sur estuvieron representados, además de un gran número de países consumidores y productores que actúan en la región, con lo que el total de participantes fue de 145.

Las actas de la reunión están formadas por 30 comunicaciones escritas y los correspondientes debates, más los informes de tres grupos de trabajo. Contienen gran abundancia de modelos geológicos inéditos, estudios de favorabilidad e información sobre recursos uraníferos. Para comodidad del lector esta información se ha agrupado por su contenido en torno a cinco temas: a) Evolución geocronológica y tectónica del Continente Sudamericano y su potencial uranífero; b) Técnicas de exploración aplicables a los ambientes sudamericanos; c) Reconocimiento preliminar y estudios regionales de favorabilidad; d) Mineralizaciones uraníferas; geología y desarrollo minero; e) Obtención de uranio como subproducto de otras explotaciones mineras.

El Organismo expresa su agradecimiento a todos los expertos que tomaron parte en la reunión del Grupo Asesor, en particular a los que presentaron memorias, participaron en los debates y presidieron los grupos de trabajo, por su ayuda para preparar los informes. Por último, expresa su sincera gratitud al Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) por la excelente organización de la reunión y a la generosa hospitalidad dispensada a los participantes y al personal del Organismo.

## EDITORIAL NOTE

*The papers and discussions have been edited by the editorial staff of the International Atomic Energy Agency to the extent considered necessary for the reader's assistance. The views expressed and the general style adopted remain, however, the responsibility of the named authors or participants. In addition, the views are not necessarily those of the governments of the nominating Member States or of the nominating organizations.*

*Where papers have been incorporated into these Proceedings without resetting by the Agency, this has been done with the knowledge of the authors and their government authorities, and their cooperation is gratefully acknowledged. The Proceedings have been printed by composition typing and photo-offset lithography. Within the limitations imposed by this method, every effort has been made to maintain a high editorial standard, in particular to achieve, wherever practicable, consistency of units and symbols and conformity to the standards recommended by competent international bodies.*

*The use in these Proceedings of particular designations of countries or territories does not imply any judgement by the publisher, the IAEA, as to the legal status of such countries or territories, of their authorities and institutions or of the delimitation of their boundaries.*

*The mention of specific companies or of their products or brand names does not imply any endorsement or recommendation on the part of the IAEA.*

*Authors are themselves responsible for obtaining the necessary permission to reproduce copyright material from other sources.*

## NOTA EDITORIAL

*El Organismo Internacional de Energía Atómica ha editado las memorias y las discusiones en la medida que se ha considerado necesaria para ayudar al lector; no obstante, la responsabilidad por las opiniones expresadas y el estilo general adoptado corresponden a los autores o participantes citados. Las opiniones de los autores o participantes no son necesariamente las de los Gobiernos o las de las organizaciones que los han propuesto.*

*Las memorias que se han incluido en las Actas sin que el Organismo haya modificado su presentación lo han sido con conocimiento de los autores y de sus autoridades gubernamentales, cuya cooperación se agradece sinceramente. Las Actas se imprimieron por composición mecanotípica y fotolitografía offset. Dentro de las restricciones que impone este método no se han escatimado esfuerzos para obtener y mantener una impresión de alta calidad, y en particular, para conseguir, en lo posible, la concordancia entre las unidades y los símbolos, y la conformidad con las normas recomendadas por los órganos internacionales competentes.*

*Los nombres utilizados en estas Actas para designar a un país o territorio no implican juicio alguno por parte del OIEA sobre la condición jurídica de los países o territorios citados o de sus autoridades e instituciones, ni respecto de la delimitación de sus fronteras.*

*La mención de empresas específicas o de sus productos o marcas comerciales no implica ningún género de reconocimiento o recomendación por parte del OIEA.*

*Los autores tienen que encargarse de obtener el permiso necesario para reproducir material de otras fuentes que esté sujeto al derecho de propiedad intelectual.*

# CONTENTS

## INDICE

### I. GEOCHRONOLOGICAL AND TECTONIC EVOLUTION OF THE SOUTH AMERICAN CONTINENT AND ITS URANIUM POTENTIAL

### I. EVOLUCION GEOCHRONOLOGICA Y TECTONICA DEL CONTINENTE SUDAMERICANO Y SU POTENCIAL URANIFERO

Evolución tectónica de la corteza continental de Sudamérica y su importancia en la caracterización de provincias uraníferas (IAEA-AG-162/01) .....	3
<i>U.G. Cordani</i>	

The Permo-Triassic uranium deposits of Southern Africa within the African-South American Gondwana framework (IAEA-AG-162/02) .....	25
<i>P.D. Toens, J.P. le Roux</i>	

### II. EXPLORATION TECHNIQUES APPLICABLE TO THE SOUTH AMERICAN ENVIRONMENTS

### II. TECNICAS DE EXPLORACION APLICABLES A LOS AMBIENTES SUDAMERICANOS

Gases in uranium exploration (IAEA-AG-162/03) .....	47
<i>R. J. Wright, J.C. Pacer</i>	

High sensitivity airborne radiometric surveying over tropical and rain forest areas (IAEA-AG-162/04) .....	63
<i>K.A. Richardson</i>	

La préreconnaissance géochimique de l'uranium (IAEA-AG-162/05) .....	79
<i>A. Grimbert</i>	

Two concepts of uranium geology in the United States of America that may be useful in Latin American uranium exploration (IAEA-AG-162/06) .....	89
<i>D.L. Curry</i>	

Técnicas aéreas de terreno y de sondeo para la exploración de uranio (IAEA-AG-162/07) .....	105
<i>J.G. Baird, J.L. Seara</i>	
Técnicas de exploración de uranio empleadas en Bolivia (IAEA-AG-162/08) .....	117
<i>V. Virreira</i>	
Cost-effective geophysical survey systems for uranium exploration (IAEA-AG-162/09) .....	123
<i>J.C. Hasbrouck</i>	
Métodos indirectos de prospección de uranio aplicados por Nuclebras (IAEA-AG-162/10) .....	129
<i>C.A. da Vinha</i>	

### III. PRELIMINARY RECONNAISSANCE AND REGIONAL FAVOURABILITY STUDIES

### III. RECONOCIMIENTO PRELIMINAR Y ESTUDIOS REGIONALES DE FAVORABILIDAD

Determinación de áreas favorables para la prospección de uranio en territorio boliviano (IAEA-AG-162/11) .....	155
<i>E. Pardo</i>	
Uranium exploration in Ecuador (IAEA-AG-162/12) .....	179
<i>B. Severne, P.F. Peñaherrera, V.S. Fiallos</i>	
Exploración de uranio en Venezuela: Situación a fines de 1978 (IAEA-AG-162/13) .....	191
<i>J. Pasquali</i>	
Favorabilidad geológica y potencial uranífero de la Argentina (IAEA-AG-162/14) .....	205
<i>A.E. Belluco, F. Rodrigo</i>	
Antecedentes de la prospección y análisis de la favorabilidad geológico-uranífera del Perú (IAEA-AG-162/15) .....	253
<i>J.E. Sosa, G. Arroyo, A.E. Belluco</i>	
Ambientes favorables para la deposición de uranio en la Faja Subandina y Llano Amazónico del Perú (IAEA-AG-162/16) .....	269
<i>L. Cánepa, F. Rosado</i>	
Manifestaciones uraníferas conocidas en Colombia (IAEA-AG-162/17) .....	301
<i>H. Rodríguez, J.A. Aluja, J. Pfeiffer, L.A. Cortés</i>	
Uranium in Brazil (IAEA-AG-162/18) .....	315
<i>G.J. Ayres</i>	

Programa de prospección de uranio en Chile (IAEA-AG-162/19) .....	357
<i>L.E. Pérez, M. Rojo, R.L. Moxham</i>	
Preliminary reconnaissance for uranium in Paraguay (IAEA-AG-162/20) .....	373
<i>C. Premoli, J. Velázquez</i>	
Programa nacional de desarrollo de los recursos uraníferos de la Argentina (IAEA-AG-162/21) .....	395
<i>F. Rodrigo, A.E. Belluco</i>	
Proyecto de investigación de las posibilidades de uranio en Costa Rica (IAEA-AG-162/22) .....	415
<i>R. Castillo</i>	
Observaciones sobre la relación entre facies lacustrinas y yacimientos de uranio en sedimentos continentales (IAEA-AG-162/23) .....	421
<i>E.A. Noble</i>	
Prospección uranífera y favorabilidad geológica en el Uruguay (IAEA-AG-162/24) .....	429
<i>H.J. Goso</i>	

#### IV. URANIFEROUS MINERALIZATIONS; GEOLOGY AND MINE DEVELOPMENT

#### IV. MINERALIZACIONES URANIFERAS; GEOLOGIA Y DESARROLLO MINERO

Consideraciones sobre la geología y metalogenia de algunos indicios chilenos de uranio (IAEA-AG-162/25) .....	451
<i>M.W. Flückiger, E. Abad, M. Martín</i>	
Mineralización de uranio en rocas volcánicas terciarias de la formación Los Frailes, Bolivia (IAEA-AG-162/26) .....	485
<i>A. Aparicio</i>	
Geology of the Espinharas uranium deposit, Brazil (IAEA-AG-162/27) .....	521
<i>R.K. Ballhorn, V.K. Thakur, J.E.C. da Fonte, V. Suckau</i>	
Geology and mining development of the C-09 uranium deposit (IAEA-AG-162/28) .....	533
<i>R. Santos</i>	
Phosphoro-uraniferous mineralization associated with sodium episyenites in the Ceara Precambrian (Brazil) (IAEA-AG-162/29) .....	555
<i>A.G. Angeiras, A.M. Netto, M. de Campos</i>	

**V. RECOVERY OF URANIUM AS BY-PRODUCT OF OTHER MINING OPERATIONS**  
**V. OBTENCION DE URANIO COMO SUBPRODUCTO DE OTRAS EXPLOTACIONES MINERAS**

Planta piloto de recuperación de uranio a partir de soluciones de lixiviación de cobre en Chuquicamata Sur, Chile (IAEA-AG-162/29) .....	581
<i>P. Garrido, E. Andalaft, R. Soto</i>	

**REPORTS OF THE WORKING GROUPS**  
**INFORMES DE LOS GRUPOS DE TRABAJO**

Grupo de trabajo 1: Técnicas de exploración aplicadas a ambientes geológicos de América Latina .....	595
Grupo de trabajo 2: Correlación geológica y tectónica entre Africa y Sudamérica, aplicada a la exploración de uranio .....	603
Grupo de trabajo 3: Geología y estratigrafía del uranio en América Latina .....	607

<b>LIST OF PARTICIPANTS</b> <b>LISTA DE PARTICIPANTES</b> .....	615
--	-----

<b>LIST OF PERUVIAN OBSERVERS</b> <b>LISTA DE OBSERVADORES PERUANOS</b> .....	623
--	-----

**I. GEOCHRONOLOGICAL AND TECTONIC EVOLUTION  
OF THE SOUTH AMERICAN CONTINENT  
AND ITS URANIUM POTENTIAL**

**I. EVOLUCION GEOCRONOLOGICA Y TECTONICA  
DEL CONTINENTE SUDAMERICANO  
Y SU POTENCIAL URANIFERO**



# EVOLUCION TECTONICA DE LA CORTEZA CONTINENTAL DE SUDAMERICA Y SU IMPORTANCIA EN LA CARACTERIZACION DE PROVINCIAS URANIFERAS

U.G. CORDANI

Centro de Investigações Geocronológicas,  
Universidade de São Paulo,  
Brazil

## Abstract-Resumen

### TECTONIC EVOLUTION OF THE CONTINENTAL CRUST OF SOUTH AMERICA AND ITS IMPORTANCE IN THE CHARACTERIZATION OF URANIFEROUS PROVINCES.

The tectonic evolution of the South American Continent and its relationship with uranium mineralization is discussed. During the Phanerozoic at least three phases are identified as related to the Andean chain, namely, in the lower Palaeozoic, in the upper Palaeozoic and in the Mesozoic. Recent systematic age dating of the Precambrian indicates the period of 450–700 million years (m.y.) (Brazilian Cycle) as one of the most important tectonic events in South America. Another age-dating cluster corresponds to the 1700–2100 m.y. interval (Transamazonian Cycle). An even older event within the Archean is identified with datings older than 2600 m.y. in Venezuela (Estado Bolívar), Surinam and Brazil (Bahía, Santa Catarina, Goiás). All the Brazilian uranium deposits related to the Brazilian platform, such as Amorinópolis, are located on the eastern border of the platform where the Brazilian tectonic cycle is dominant. The uranium source rocks are of alkaline granitic nature. Other deposits (Itataia, Campos Belos) are associated with polycyclic rocks belonging to the basement of the Brazilian Cycle but were affected by the 450–700 m.y. tectonic event; these amphibolitic facies rocks show alkaline metamorphism and magmatization processes which indicate large geochemical mobility during which important uranium mobilization has taken place. Finally, the Poços de Caldas deposit is excellent evidence of the important relationship of tectonic reactivations and uranium enrichments within the Brazilian platform.

### EVOLUCION TECTONICA DE LA CORTEZA CONTINENTAL DE SUDAMERICA Y SU IMPORTANCIA EN LA CARACTERIZACION DE PROVINCIAS URANIFERAS.

Se examina la evolución tectónica del Continente Sudamericano y sus relaciones con la mineralización del uranio. Durante el Fanerozoico se identifican como mínimo tres fases orogénicas relacionadas con la Cordillera Andina, a saber, una en el Paleozoico inferior, otra en el Paleozoico superior y la tercera en el Mesocenoico. La reciente datación sistemática del Precámbrico indica que el período de 450–700 millones de años (m.a.) (Ciclo brasileño) es uno de los fenómenos tectónicos más importantes de América del Sur. Otra datación absoluta corresponde al intervalo de 1700–2100 m.a. (Ciclo transamazónico). Un fenómeno aún más viejo en el Arcaico ha sido identificado con dataciones de más de 2600 m.a. en Venezuela (Estado Bolívar), Surinam y Brasil (Bahía, Santa Catarina, Goiás). Todos los yacimientos uraníferos del Brasil relacionados con la plataforma brasileña, por ejemplo el de Amorinópolis, están situados en el borde oriental de la plataforma donde predomina el ciclo tectónico brasileño.

Las rocas madres del uranio son de naturaleza granítica alcalina. Otros yacimientos (Itaia, Campos Belos) están asociados a rocas policíclicas pertenecientes al basamento del Ciclo brasileño, pero fueron afectados por el fenómeno tectónico ocurrido hace 450–700 m.a.; estas rocas de facies anfibolítica presentan un metamorfismo alcalino y procesos de magmatización que indican una gran movilidad geoquímica durante la cual tuvo lugar una importante movilización del uranio. Por último, el yacimiento de Poços de Caldas es una excelente prueba de las relaciones importantes entre las reactivaciones tectónicas y los enriquecimientos en uranio en la plataforma del Brasil.

## 1. INTRODUCCION

En los problemas de prospección de yacimientos uraníferos, el factor tiempo ha sido considerado recientemente como muy importante [1, 2]. A este respecto, los datos geocronológicos son útiles en dos puntos principales: 1) para un mejor conocimiento de los procesos y de las épocas posibles de movilización y concentración de uranio, y 2) como elemento de identificación de provincias uraníferas y consequentemente de delimitación de zonas más favorables a la prospección.

El reconocimiento y la evaluación de zonas uraníferas son temas muy complejos y todavía no hay acuerdo general sobre las mejores maneras de afrontarlos. Existen sin embargo algunos elementos orientadores, basados en el comportamiento geoquímico del uranio y en la experiencia obtenida en los estudios de los principales yacimientos uraníferos de la Tierra.

Por ejemplo, se sabe que el uranio es un elemento litófilo, y los procesos de su concentración a partir del interior de la Tierra son unidireccionales, de dentro para afuera, en el sentido del enriquecimiento continuo de la corteza terrestre [3]. Además, es admitida mayor concentración de uranio en las rocas antiguas, arqueanas, en virtud de un proceso temprano de emigración a partir del manto superior, relacionado con la incompatibilidad cristaloquímica del uranio. En ocasiones posteriores de la historia de la Tierra, este elemento puede ser movilizad en consecuencia a gradientes de temperatura creados por procesos tectónicos en cinturones orogénicos.

Parece ser también de gran importancia, como control de concentración de uranio, la existencia de grandes fallas tensionales y/o direccionales, las cuales se producen durante la estabilización tectónica que sigue a un episodio geodinámico principal. Por ejemplo, muchas de las manifestaciones conocidas de yacimientos de uranio están asociadas a la estabilización tectónica de 1700–1800 millones de años (m.a.) [1]. En estas ocasiones, el uranio puede emigrar hacia las márgenes de las fajas orogénicas (en sedimentos pericratónicos del “antepaís”) o concentrarse en estructuras tensionales, como grandes zonas cataclásticas.

Por otro lado, hay pruebas evidentes de que muchos yacimientos uraníferos están confinados en zonas de la corteza terrestre que, primariamente, ya habían

sido enriquecidas en uranio [4, 5]. Esto permite definir provincias uraníferas, que serían aquellas en que el contenido promedio inicial de uranio ya es superior al “Clark” de concentración del elemento, lo que permite sucesivas introducciones y removilizaciones para formar eventuales yacimientos uraníferos. En todos estos casos es importante conocer los procesos de tectonismo anorogénico, o tafrogénico, causantes de la concentración del uranio, y por supuesto su edad [6].

Por todos los motivos arriba expuestos, ya vemos que es esencial el conocimiento de la evolución tectónica completa de la corteza continental de la región en investigación, para que sea tenido en cuenta en las planificaciones globales de prospección uranífera. Esto es lo que pretendemos hacer en este trabajo, en relación con Sudamérica. Por supuesto, nuestro estudio se basa en los datos geocronológicos existentes para el continente, gran parte de ellos obtenidos en el Centro de Investigaciones Geocronológicas de la Universidad de São Paulo.

## 2. MECANISMOS DE FORMACION DE LA CORTEZA CONTINENTAL TERRESTRE

Antes de entrar en comentarios específicos, creemos necesario tratar en líneas generales lo que entendemos por evolución geológica de la corteza continental. Buena parte de este tema queda en los confines de la filosofía geológica, pues todavía no se ha establecido hasta qué punto puede extrapolarse el actualismo hacia el pasado, y hasta qué punto los regímenes tectónicos de la Tierra pueden considerarse bien conocidos y aceptados. Por ejemplo ¿puede extrapolarse la tectónica global, que tan bien explica la geodinámica del Meso- y Cenozoico, al Precámbrico? Y por otro lado ¿pueden identificarse los regímenes tectónicos, responsables de la formación de cinturones verdes (“greenstone belts”) del Arqueano, en épocas posteriores?

Por la experiencia acumulada en el estudio de zonas arqueanas, se supone que en el inicio de la historia de nuestro planeta ocurrían una serie de fenómenos diferentes de los actuales, relacionados con gradientes de temperatura más elevados. En Sudáfrica se han descrito y caracterizado los cinturones verdes como de estilo estructural propio, de intensa deformación y asociados a grandes regiones de rocas gnéisicas y graníticas [7]. ¿Hasta qué punto, en el tiempo, se formaron tales terrenos? Existen algunos datos, sin comprobación definitiva, que indican que se formaron tal vez hasta aproximadamente 2000 m.a. Por otro lado, el régimen tectónico moderno se caracteriza por movimientos horizontales de grandes placas en la parte superficial de la Tierra. Se explican así los cinturones de montañas por colisiones de placas litosféricas, la formación de corteza oceánica en las dorsales oceánicas, y los demás fenómenos geodinámicos modernos, por lo menos a partir del Mesozoico [8, 9]. ¿Hasta qué punto podemos regresar en el tiempo, con el régimen de tectónica de placas? En el Paleozoico, e incluso en el Precámbrico

superior, se formaron muchos cinturones análogos a los modernos, que se podrían interpretar de esta forma; sin embargo, para épocas más lejanas, todos los trabajos que aplican la tectónica de placas son necesariamente de tipo especulativo.

Probablemente haya que considerar por lo menos dos tipos de regímenes tectónicos distintos, y no contemporáneos: uno muy antiguo y relacionado con la corteza primitiva de la Tierra, y el otro, moderno, asociado a los movimientos geodinámicos actuales. Sin embargo, fajas móviles ("mobile belts") productoras de rocas graníticas se formaron aparentemente durante todo el tiempo geológico.

Las fajas móviles son características de los procesos geodinámicos formadores de corteza continental, y pueden definirse como cinturones metamórficos de medio y alto grado, con deformaciones policíclicas, granitización y migmatización sintectónicas, y retrabajamiento tectónico de la corteza continental anterior [10]. Este último punto es muy importante, pues aproximadamente un 80% de las fajas móviles descritas se emplazan sobre basamento "continental" anterior, y por lo tanto son de tipo "ensiático".

La ubicación de los cinturones móviles en el espacio y en el tiempo puede hacerse por una serie de evidencias, entre las cuales hay tres principales:

- 1) El cinturón tiene direcciones estructurales propias con deformaciones coherentes en toda su extensión.
- 2) La evidencia petrológica debe confirmar la estructural, pues la mineralogía de las rocas metamórficas sintectónicas se genera al mismo tiempo que las estructuras. Además, la petrología permite la identificación de rocas anteriores, policíclicas, por sus minerales y texturas premetamórficos.
- 3) El conjunto de edades radiométricas (obtenido por métodos distintos y en distintos materiales) tiene que ser coherente a lo largo de toda la extensión de la faja móvil.

Por lo tanto, el conocimiento de edades geocronológicas, asociado a las evidencias suministradas por trabajos petrológicos y estructurales permitirán ubicar adecuadamente los varios episodios a que fué sometido un cinturón móvil: fases de cristalización y deformación, enfriamiento regional final, y también la posición y características de los núcleos retrabajados del basamento.

Cabe indicar que las unidades geotectónicas aquí descritas como "fajas móviles" incluyen los cinturones modernos plegados ("folded belts"), pero sin compromiso con la teoría geosinclinal en el sentido de que no es esencial una sedimentación anterior de tipo margen continental (geosinclinal) para que se produzca el desarrollo de una faja móvil en una región determinada.

Utilizando este amplio concepto de cinturón móvil, es posible visualizar la evolución geológica de la corteza continental a partir de núcleos antiguos, por sucesivas adiciones de material granítico en el tiempo geológico, por la acción de fajas móviles. Todavía se discute mucho sobre esto, pues para algunos la casi totalidad de material granítico continental se formó en el Arqueano y sufrió

regeneraciones y movilizaciones posteriores, sin adiciones importantes de material nuevo; sin embargo, para otros, el volumen de material granítico formado en el Arqueano fué relativamente menor, y los continentes crecieron continuamente en el tiempo geológico por adiciones de material proveniente del manto.

Si se tienen en cuenta los datos de los isótopos de estroncio y, especialmente, la variación temporal de la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en las rocas graníticas continentales, se observa que el proceso de adición de material primario, o sea la acreción continental, parece predominar sobre el proceso de retrabajamiento de material preexistente [11]. Se reconoce, sin embargo, que hay un importante componente granítico antiguo, claramente visible dado el carácter ensialico de gran parte de los cinturones móviles, a lo largo de todo el transcurso geológico.

Un análisis de las determinaciones de edad existentes en todos los continentes permite verificar cuáles fueron las épocas principales de actividad de los cinturones móviles. Así, hay pocos casos citados de edades muy antiguas, entre 3500 y 4000 m.a.; algunas entre 3000 y 3500 m.a.; muchas en los intervalos de 2600 a 2900 m.a., y de 1700 a 2100 m.a.; diversas entre 1000 y 1400 m.a., y un grande número con edades menores de 700 m.a. En todas estas épocas, con algunas dudas en cuanto a las más antiguas, hubo fajas móviles en todos los continentes, y si intentamos una estimación cuantitativa del porcentaje de corteza continental producido en cada época, llegamos a la conclusión de que aproximadamente un 10% ya existía alrededor de 3500 m.a., lo que es considerable, y quizás un 50% en el límite Arqueano/Proterozoico (2600 m.a.). Esto quiere decir que en los primeros 1500 millones de años de la historia de la Tierra se formó corteza granítica en gran cantidad, del orden de la mitad de la existente hoy en día, y la mitad restante se produjo por acreción, o sea por adición a partir del manto, en cinturones móviles sucesivos [11].

Como el espesor de la corteza granítica es del orden de 30–40 km y, en cambio, la extensión de una faja móvil es de miles de kilómetros y su anchura de 300–400 km, tenemos inmediatamente que considerar la acreción continental “lateral” como más importante que la “vertical”, lo que permite la caracterización de cada cinturón móvil como una “provincia” de edad coherente. Tales provincias de edad—unidades principales, cuando intentamos definir la evolución tectónica de un continente, pueden ser identificadas por direcciones estructurales características y por una evolución en el tiempo indicada por dataciones radiométricas en general, comprendidas en un intervalo de edad del orden de 200–300 m.a.

### 3. EVOLUCION TECTONICA DE SUDAMERICA

Aplicando los conceptos arriba expuestos al Continente Sudamericano, se puede explicar su evolución tectónica desde el Proterozoico inferior y en parte desde el Arqueano hasta el presente, por el sucesivo desarrollo de cinturones móviles.

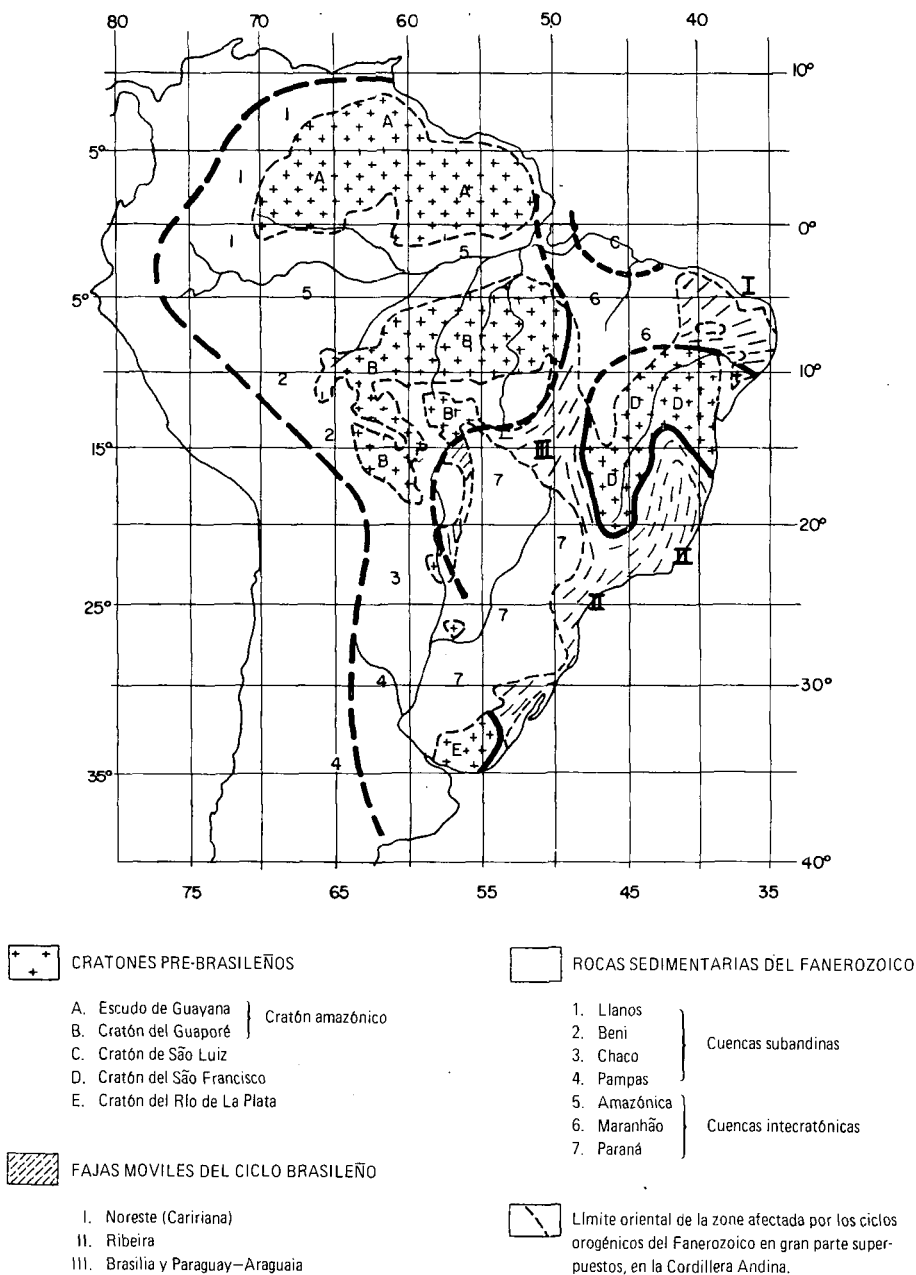


FIG.1. Principales unidades estructurales de Sudamérica.

La situación geodinámica actual del continente ubica en la infraestructura de la cadena andina una gran faja móvil moderna. En esta región, las condiciones ambientales son de metamorfismo de medio y alto grado, seguramente acompañados por fenómenos de granitización, migmatización, anatexis y palingénesis, como lo demuestran los sucesivos episodios magmáticos (volcánicos y plutónicos) asociados a los magmas generadores de los enormes batolitos andinos. Además, en los Andes hay acreción del continente, por adición de material magmático originado en la zona de Benioff por fusión parcial de la placa litosférica en subducción [12]. El espesor de la corteza en los Andes es del orden de los 60 y hasta 70 km. Y en la supraestructura andina, los plegamientos de los sedimentos y de las rocas volcánicas y epimetamórficas demuestran los continuados esfuerzos tectónicos regionales, cuya duración alcanza muchas decenas de millones de años [13, 14].

La cadena andina tiene como antepaís el “Escudo Brasileño”, una plataforma tectónicamente estable [15] formada a fines del Precámbrico e inicios del Fanerozoico por un proceso de cratonización derivado de la estabilización tectónica final de los cinturones móviles del Ciclo orogénico brasileño. Sobre rocas de esta gran unidad geotectónica, en las regiones vecinas a la Cordillera Andina, se formaron en el Meso- y Cenozoico las cuencas de sedimentación pericratónicas de los Llanos, Beni, Chaco y Pampas (Fig. 1).

Por lo tanto, en todo el Fanerozoico, la evolución tectónica de Sudamérica tiene relación con los episodios orogénicos de la cadena andina, la cual tuvo por lo menos tres ciclos principales, uno en el final del Precámbrico Paleozoico inferior, otro en el Paleozoico superior, y el tercero en el Mesocenoico. Cada uno de ellos tuvo varias fases compresivas, las cuales fueron más o menos sincrónicas a lo largo de toda la cadena [16, 17].

Para el Precámbrico, las evidencias y la reconstrucción tentativa de la historia evolutiva del Continente Sudamericano vienen de las determinaciones radiométricas realizadas en los últimos diez a quince años. Si se ubican estas edades en un histograma, sin discriminarlas según el método utilizado y el material original empleado en cada caso, se podría verificar que gran parte de ellas, quizá la mitad, se situaría en el intervalo de edad entre 450 y 700 m.a., definiendo el ciclo brasileño como uno de los más importantes en Sudamérica [18].

Otro período importante como formador de corteza granítica es el correspondiente al Ciclo transamazónico, entre 1700 y 2100 m.a. [19]. Muchas determinaciones radiométricas con valores intermedios entre los dos ciclos principales, brasileño y transamazónico, demuestran la actividad localizada de algunos cinturones móviles pertenecientes a ciclos orogénicos distintos, principalmente en la región amazónica. Finalmente, se identificaron varias regiones muy antiguas, con dataciones arqueanas, o sea anteriores a 2600 m.a., como por ejemplo en el Estado Bolívar de Venezuela, en Surinam, y en los estados de Bahía, Santa Catarina y Goiás del Brasil.

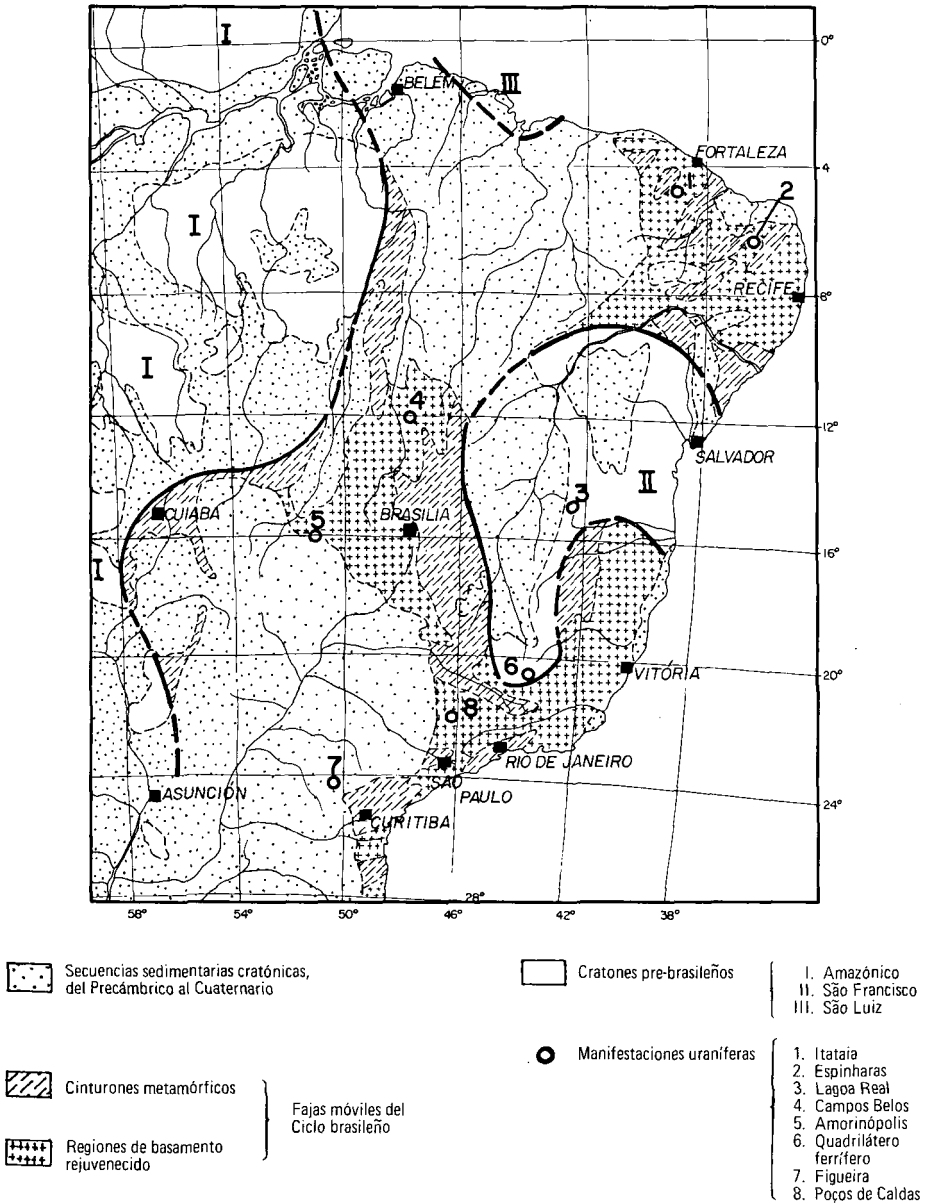


FIG.2. Situación geotectónica de la parte oriental de la "Plataforma Brasileira" a finales del Precámbrico y ubicación de las principales manifestaciones uraníferas.

La “Plataforma Brasileira” puede dividirse naturalmente en dos partes distintas y características: la región amazónica, de evolución tectónica más antigua, y la región oriental que ocupa gran parte del territorio brasileño, donde fué muy fuerte la influencia del Ciclo orogénico brasileño, a partir del final del Precámbrico.

Las Figs 1 y 2 presentan la situación geotectónica de Sudamérica al final del Precámbrico, con la ubicación de los principales cinturones orogénicos del Ciclo brasileño, y las regiones cratónicas existentes. Es posible verificar la enorme extensión del cratón amazónico, y la posición de las áreas cratónicas menores de São Luiz, del São Francisco, y del Río de la Plata. En realidad, si tenemos en cuenta la union pre-Mesozoica de Africa y Sudamérica [19], las áreas cratónicas de São Luiz y del São Francisco no representan nada más que pequeñas extensiones de los grandes cratones de Africa Occidental y del Congo, los cuales ocupan extensas superficies en el continente africano [19].

### 3.1. Actividad tectonomagmática en el Ciclo brasileño

En la parte oriental de la “Plataforma Brasileira”, el conjunto de los cinturones móviles brasileños presenta direcciones estructurales perfectamente coherentes [18]. El sistema de pliegues del noreste, ubicado en el borde atlántico del Brasil, entre São Luiz y aproximadamente Aracaju, presenta direcciones estructurales E-W y NW-SE, y su faja de pliegues meridional, denominada “Faja Sergipana”, tiene una clara convergencia estructural y metamórfica en dirección al cratón del São Francisco. El sistema de pliegues Ribeira, ubicado a lo largo del litoral atlántico del Brasil y de Uruguay, presenta direcciones estructurales paralelas a la costa, y convergencias hacia el interior del continente. Un tercer gran sistema de pliegues brasileño se sitúa en la región central de la plataforma, separando el cratón amazónico de las regiones cratónicas menores que se producen al oriente; este sistema incluye dos grandes unidades geotectónicas estructuralmente simétricas en el estado de Goiás: las fajas de pliegues Brasilia y Paraguay–Araguaia, entre las cuales existe una grande zona de rocas antiguas pero reactivadas durante el Ciclo brasileño, que constituyen el complejo basal goiano.

En la mayor parte de las zonas, la exposición en superficie es de rocas graníticas, gnéisicas y migmatíticas que forman la infraestructura expuesta de los cinturones móviles, y por lo tanto las relaciones geológicas entre tales rocas son muy complejas. Sin embargo, las determinaciones geocronológicas existentes demuestran claramente que la evolución tectonomagmática de todos los sistemas del Ciclo brasileño es sincrónica. En todos ellos, el metamorfismo regional principal, o sea la fase de recristalización sintectónica de los minerales metamórficos, asociada al magmatismo sintectónico, se sitúa en el tiempo entre 650 y 700 m.a. de edad [18, 20]. Otros episodios formadores de granitos, en parte tardíos y postectónicos, presentan edades de entre 500 y 600 m.a. Vulcanitas asociadas claramente a los yacimientos molásicos postorogénicos, en varias zonas, presentan edades entre

450 y 500 m.a., y se obtienen valores similares en toda la zona correspondiente a las fajas móviles brasileñas, por dataciones K-Ar en micas, indicando el enfriamiento regional del ciclo [20–22].

Es muy importante en la búsqueda de eventuales removilizaciones de uranio el reconocimiento de regiones de basamento retrabajado en el interior de las fajas móviles brasileñas. En muchos casos, por el tipo de asociación geológica (ambiente metamórfico de facies anfibolito y composición global granítica), este intento es de difícil realización pues las rocas de metamorfismo medio y alto formadas en el cinturón mismo, cuando son polifásicas, pueden ser muy similares en petrografía y estructura a aquellas del basamento reactivado. Sin embargo, cuando hay determinaciones radiométricas suficientes, es posible identificar las rocas policíclicas por su patrón geocronológico distinto, o sea: determinaciones K-Ar en micas con valores brasileños, y determinaciones Rb-Sr en roca total con valores claramente pre-brasileños. Es el caso, por ejemplo, de las rocas de las formaciones Barbacena y Paraíba do Sul en el cinturón metamórfico Ribeira [23], y de las rocas de la formación Encantadas, en la parte meridional de la misma unidad [21]. Es el caso también de varias rocas de la formación Caicó en altos estructurales del noreste del Brasil, y del Complejo basal goiano, entre las fajas móviles Brasília y Paraguaná-Araguaia. Estos ejemplos, entre varios otros, demuestran el carácter ensiálico de todos los cinturones del Ciclo brasileño de Sudamérica, formados por lo tanto a partir de corteza continental anterior, de edades radiométricas variables (desde 1000–1200 m.a. hasta cerca de 3000 m.a.), que fué evidentemente rejuvenecida y en parte regenerada por los episodios tectonotermiales del final del Precámbrico.

### 3.2. Evolución tectónica de las áreas cratónicas menores, en la parte oriental de la “Plataforma Brasileira”

Las pocas determinaciones de edad que existen en las zonas cratónicas de São Luiz y del Río de La Plata [18, 19] permiten atribuirles una formación evidentemente pre-brasileña, y afirmar que durante el final del Precámbrico e inicios del Fanerozoico permanecieron tectónicamente estables y libres de calentamientos en escala regional. Gran parte de las dataciones disponibles para estas regiones se sitúan en el intervalo característico del Ciclo transamazónico, entre 1700 y 2100 m.a. de edad.

Para el cratón de São Francisco, en los estados de Bahía y Minas Gerais de Brasil, las condiciones de estabilidad tectónica durante el Ciclo brasileño no fueron totales a causa de la intensa actividad en las fajas de pliegues formadas alrededor de la unidad a finales del Precámbrico (Vasa Barris, Río Preto, Brasília, Araçuaí). Incluso las secuencias sedimentarias de tipo cratónico (Grupo Bambuí y sincrónicas), depositadas sobre el cratón, muestran señales de la actividad tectónica brasileña hasta a más de 200 km de distancia de los bordes de la unidad [24].

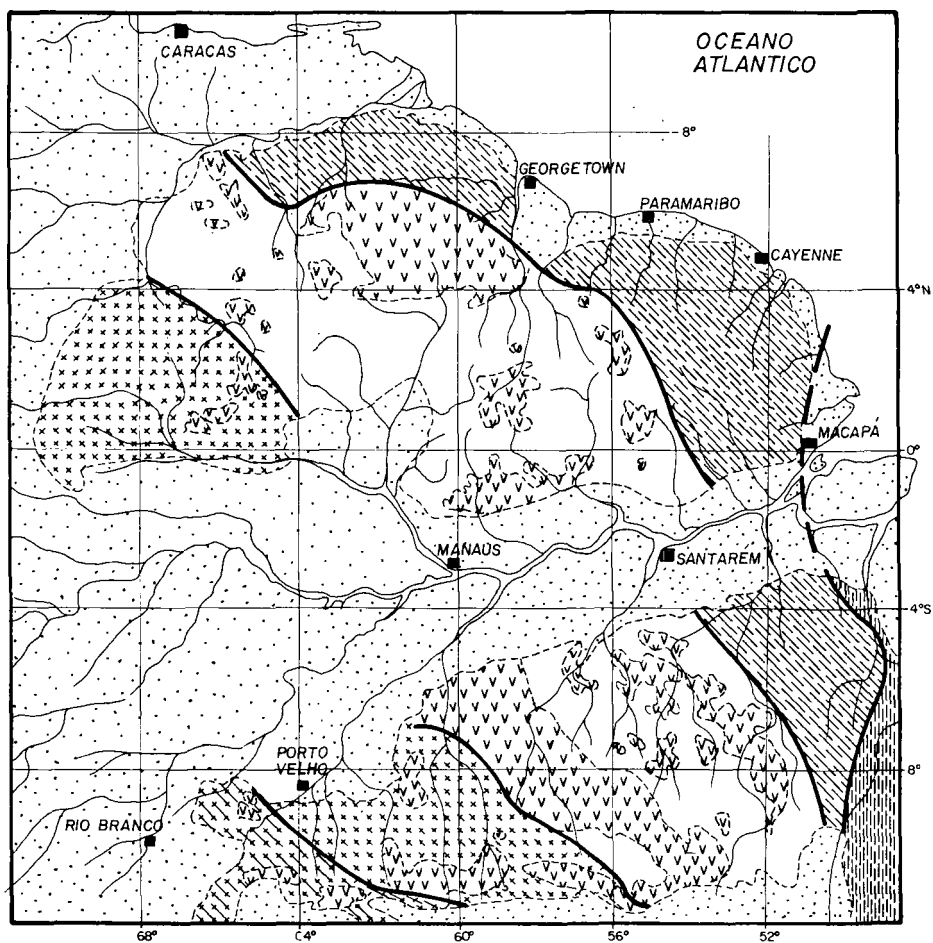
En las zonas expuestas del cratón, las dataciones disponibles son antiguas, y permiten la caracterización de por lo menos tres regiones con evolución tectónica distinta:

- 1) El complejo granulítico de Jequié, con edades Rb-Sr en roca total del orden de 2700 m.a., y edades K-Ar en micas de cerca de 1700–1800 m.a. [25]. En núcleos aislados, como el de Mutuipe, en Bahía, se obtuvieron edades radiométricas de aproximadamente 3200 m.a. [25].
- 2) El cinturón móvil ubicado entre Salvador y Juazeiro (Bahía), en el que se produjo una intensa granitización y migmatización durante el Ciclo transamazónico (2100–1700 m.a.) [26].
- 3) La región del sistema de pliegues Espinhaço, ubicada en su parte meridional en el borde oriental del cratón del São Francisco (Minas Gerais) pero que en su parte norte atraviesa completamente la unidad de norte a sur (Bahía). Este sistema representa probablemente una sedimentación de paraplateforma que ocurrió inmediatamente después del Ciclo transamazónico, y sufrió metamorfismo epizonal acompañado de plegamientos y fallas de empuje entre 1100 y 1300 m.a. [27].

### 3.3. Evolución tectónica del cratón amazónico

Con relación a la enorme región del cratón amazónico, los datos geológicos son todavía de tipo reconocimiento y, en general, se desconocen las relaciones geológicas entre las diferentes unidades lito-estratigráficas existentes. En muchos casos, las dataciones radiométricas son las únicas evidencias que pueden servir para intentar establecer una secuencia de acontecimientos en la evolución tectónica regional. En los últimos años, el Proyecto Radam del Brasil, con la cooperación del Centro de Investigaciones Geocronológicas de la Universidad de São Paulo, efectuó la datación sistemática de unas 600 muestras de la región amazónica brasileña; estos resultados, junto con los ya existentes del Brasil y de los países vecinos, permitieron la caracterización de provincias de edad y, por lo tanto, la determinación tentativa de la evolución geológica de todo el cratón amazónico, según el esquema abajo propuesto, de acuerdo con Cordani [28] y con referencia a la Fig. 3.

La parte más antigua del cratón amazónico es la provincia Amazonia Central, la cual parece presentar características cratónicas desde épocas muy antiguas, como indican las secuencias vulcano-sedimentarias sobre ella depositadas, con edades variables, algunas de ellas incluso transamazónicas [28, 29]. Las rocas volcánicas de las formaciones Surumu y Caicara, estratigráficamente inferiores a las areniscas del grupo Roraima, presentan una edad cercana a 1900 m.a. Las secuencias Iricoumé y Dalbana son un poco más modernas (cerca de 1800 m.a.); aún más lo son las rocas volcánicas de las formaciones Uatumã (s. st.) y Iriri, con edades del



Provincias geocronológicas del cratón amazónico








	Secuencias sedimentarias del Fanerozoico		Paraguay - Araguaia	-	450- 700 m.a.
	Secuencias volcano-sedimentarias del Precámbrico		Rondoniana	-	1100-1400 m.a.
			Río Negro - Juruena	-	1450-1700 m.a.
			Maroni - Itacaiunas	-	1800-2100 m.a.
			Amazonia Central	-	> 2100 m.a. (?)

FIG.3. Provincias estructurales y geocronológicas de la región amazónica.

orden de 1700 m.a. Finalmente, las lavas ácidas del tipo Teles Pires, anteriores a la formación Beneficiente, en el borde sur de la provincia, presentan edades del orden de 1550 m.a. Es interesante notar la asociación en el tiempo y en el espacio de todas estas rocas volcánicas ácidas con rocas graníticas de tipo anorogénico (granitos de tipo Parguaza, Surucucu, Velho Guilherme, y otros), lo que demuestra una actividad magmática intensa y continuada, con duración global de cerca de 500 m.a., y siempre en condiciones cratónicas.

Sin embargo, en las rocas consideradas del basamento de la provincia Amazonia Central, es difícil la obtención de edades más antiguas que el Transamazónico [28, 29]. Hasta el momento son raros los resultados indudablemente arqueanos, y hacen falta datos nuevos y más detallados para aclarar la historia geológica antigua de este grande núcleo de corteza continental supuestamente primitivo.

Durante el Ciclo transamazónico, una extensa faja móvil, denominada Maroni-Itacaiunas, fué activa en el borde nororiental de la provincia Amazonia Central, con direcciones estructurales más o menos paralelas al borde del núcleo antiguo. A ella pertenecen las rocas epimetamórficas y muy deformadas de los grupos o formaciones Carichapo-Pastora, Barama-Mazaruni, Armina-Rosabel, Paramaca-Orapu-Bonidoro, Vila Nova y Grão Pará. También forman parte del cinturón móvil numerosas rocas graníticas y gnéisicas del "basamento", y de varios complejos "intrusivos" sin a postectónicos. En todas estas rocas son comunes las dataciones del orden de 2000–2100 m.a. por el método Rb-Sr en roca total, y también U-Pb en zircones, y las dataciones del orden de 1800–1900 m.a. por el método K-Ar en micas [30–32].

En muchos sitios, el basamento pretransamazónico de la faja Maroni-Itacaiunas se caracteriza por dataciones arqueanas, como las obtenidas en las rocas granulíticas de los grupos Imataca y Fallawatra [33], o aquellas obtenidas en puntos aislados de Amapá, o en la región de la Sierra de Carajás [34].

Las dataciones radiométricas comprendidas en el intervalo 1500–1700 m.a. son características de la provincia ubicada al sur del núcleo antiguo de Amazonia Central, denominada faja móvil Rio Negro-Juruena, cuyas direcciones estructurales también son paralelas con los bordes de la unidad. Las relaciones geológicas entre las unidades lito-estratigráficas de esta provincia son prácticamente desconocidas; pero el patrón geocronológico es muy coherente: todas las rocas graníticas y gnéisicas del "basamento" presentan edades Rb-Sr en roca total cercanas a 1700 m.a., y edades K-Ar en micas que varían entre 1450 y 1600 m.a. [35].

La faja móvil más joven del cratón amazónico se ubica en su extremo sur-occidental, con direcciones estructurales aproximadamente paralelas a las de la faja vecina. Ha sido denominada "Rondoniana" [36], y su evolución tectonomagmática cubre el período entre 1100 y 1400 m.a. Poco se sabe, siempre en esta provincia, sobre las relaciones geológicas, principalmente con referencia a las rocas consideradas del "basamento" y reunidas en una sola unidad (Complejo Xingu) en las publicaciones del Radam [37]. Además, en el caso de Rondonia,

la situación se complica ulteriormente dada la existencia de muchos cuerpos graníticos anorogénicos, con edades cercanas a 950 m.a. [38]. En algunos casos, se registraron dataciones aisladas con valores más viejos que 1400 m.a., lo que demuestra la presencia de un basamento continental anterior y, por lo tanto, el carácter ensiálico de la faja móvil Rondoniana.

Por lo expuesto, también para el cratón amazónico queda demostrada la importancia del Ciclo orogénico transamazónico, durante el cual se mantuvo una fuerte actividad tectonomagmática en el cinturón móvil Maroni-Itacaiunas, con una reactivación tectónica intensa en la provincia Amazonia Central. Además, otros dos períodos importantes en la evolución tectónica de la corteza continental sudamericana corresponden a la actividad de las fajas móviles Río Negro-Juruena (1450–1700 m.a.) y Rondoniana (1100–1450 m.a.). Al mismo tiempo, reactivaciones tectónicas de tipo “reflejo” afectaron a las zonas anteriormente cratonizadas, como lo demuestran los episodios denominados “Nickerie”, o “K’ Mudku” en el escudo de Guayana, cuyas edades se incluyen aproximadamente en los intervalos característicos de los cinturones activos más al sur de la provincia Amazonia Central [39].

Sin embargo, también se produjeron reactivaciones tectónicas mucho más tarde, sobre todo durante el final del Precámbrico, como reflejo de la actividad de los cinturones brasileños en la parte oriental de la “Plataforma Brasileira”, sobre las zonas cratónicas menores y también sobre el borde suroriental del cratón amazónico.

### 3.4. Tectonismo fanerozoico

Algunas reactivaciones tectónicas, localizadas esencialmente en la región pericratónica andina, ocurrieron en el Paleozoico, asociadas a la formación de las cuencas sub-andinas y como reflejo de los movimientos orogénicos en la Cordillera. Con todo, las reactivaciones más importantes, y que afectaron a toda la región de la “Plataforma Brasileira”, ocurrieron en épocas más modernas, en el Mesozoico y en el Cenozoico, asociadas a la extrusión de enormes volúmenes de lavas basálticas toleíticas y a la intrusión de cuerpos sub-volcánicos, diques doleríticos y macizos alcalinos variados [15, 40].

Las dataciones efectuadas en las rocas meso y cenozoicas permitieron la caracterización del desarrollo del magmatismo y, por supuesto también, de las actividades tectónicas relacionadas. Evidentemente, todo esto se incluye en el contexto del mecanismo de la tectónica de placas que se sigue hasta el presente, y que dió origen a la cuenca oceánica del Atlántico.

En síntesis, se puede indicar que las manifestaciones basálticas del Permo-Triásico en el escudo de Guayana y, sobre todo, los enormes diques con dirección N-S de Amapá, en el Brasil, están asociados a la formación del Atlántico Norte y a

la separación del continente norteamericano con respecto al conjunto Sudamérica-Africa [41]. Las grandes zonas de coladas basálticas de las cuencas del Paraná y del Maranhão, que empezaron en el Jurásico pero que tuvieron su máxima intensidad en el Cretácico inferior, están asociadas a la formación del Atlántico Sur, o sea a la separación de los continentes africano y sudamericano [42].

Todas las manifestaciones posteriores tanto basálticas como alcalinas de carácter tensional serían el reflejo del desarrollo progresivo de la cuenca atlántica. El volcanismo más joven, ya de carácter oceánico (sea en el fondo oceánico, sea en la plataforma continental) no es sino la continuación del mismo proceso hasta la época actual, en la que el volcanismo se concentra en la dorsal medio-atlántica [42].

#### 4. CONSIDERACIONES FINALES

Dadas las limitaciones inherentes al nivel de reconocimiento de las observaciones geológicas, principalmente en lo que se refiere a la región amazónica, y el número todavía relativamente pequeño de determinaciones radiométricas disponibles para Sudamérica, nuestras ideas sobre la reconstrucción de la evolución tectónica del continente deben ser consideradas como preliminares, y contienen una buena dosis de interpretación y especulación. Sin embargo, estamos seguros de que el esquema esencial, sobre todo el referido a la delimitación general de las provincias de edad y su ubicación en el tiempo geológico, es más o menos definitivo pues los datos geocronológicos son coherentes y muy significativos. Por lo tanto, se podría utilizar el modelo como fuente de informaciones básicas para el establecimiento de nuevos criterios y nuevos enfoques destinados a las programaciones de prospección uranífera. Tales informaciones podrían integrarse con los datos disponibles de carácter geológico y geoquímico, en especial con aquellos de carácter químico (tenores de uranio en rocas de las diferentes provincias) que todavía son tan escasos.

Se pueden hacer algunos comentarios teniendo en cuenta la situación de las manifestaciones uraníferas conocidas de la "Plataforma Brasileira" (Fig. 2) [43], y basándose también en los principios generales del ciclo geoquímico del uranio, como los mencionados en la Introducción.

Primeramente, todas estas manifestaciones están ubicadas en la parte oriental de la "Plataforma Brasileira", donde es predominante la influencia del Ciclo orogénico brasileño. En varias, como por ejemplo las de la provincia de Seridó en el Noreste, o de Amarinópolis en Goiás, la fuente del uranio son las rocas graníticas de tendencia alcalina, formadas durante el mismo ciclo. La existencia en estas regiones de grandes fallas direccionales de edad supuesta brasileña refuerza también la posibilidad de mineralizaciones importantes durante finales del Precámbrico e inicios del Paleozoico.

Sin embargo, en otros casos las mineralizaciones están asociadas a rocas policíclicas pertenecientes al basamento de los cinturones brasileños y, por lo tanto,

formadas en épocas pre-brasileñas. En esta categoría se incluyen los yacimientos uraníferos que por el momento parecen ser los más prometedores [44–46] (Itaia, Espinharas, Campos Belos). En estas manifestaciones y en otras menores, las rocas mineralizadas son de edad pre-brasileña, pero fueron profundamente afectadas por fenómenos brasileños que se traducen por metamorfismo regional de grado medio (facies anfibolito), acompañado por feldespatización, metasomatismo alcalino (principalmente sódico) y migmatización, o sea procesos indicadores de gran movilidad geoquímica, durante los cuales eventualmente pueden generarse importantes concentraciones uraníferas. También en rocas pre-brasileñas, en el cratón del São Francisco, están ubicadas las manifestaciones de Lagoa Real y del “Cuadrilátero Ferrífero”; pero en ambas parecen haber sido de gran importancia los episodios tectono-termales brasileños, traducidos por un calentamiento regional hasta condiciones epizonales y por tectonismo intenso responsable de grandes fallas de rumbo y de cabalgamiento, que pueden tener correlación con la época de removilización de uranio y formación de las mineralizaciones.

En conclusion, en la parte oriental de la “Plataforma Brasileira” nos parece importante el papel del basamento “granítico” continental pre-brasileño y reactivado, muy posiblemente como fuente de material para los procesos removilizadores de uranio. En este sentido, para caracterizar las regiones potencialmente favorables para mineralizaciones uraníferas, sería esencial la verificación del contenido original de uranio en rocas graníticas (sensu lato), tanto en aquellas de formación brasileña como en las que se formaron anteriormente y fueron reactivadas.

El hecho de que todas las manifestaciones conocidas hasta el momento se ubican en la parte oriental de la plataforma evidentemente no descarta la región amazónica como desfavorable, pues el conocimiento geológico de esta zona inmensa es muy escaso y las prospecciones sistemáticas regionales quedan aún por efectuarse. En principio, hay varias condiciones geotectónicas que parecen ser favorables para eventuales concentraciones uraníferas en el cratón amazónico y que se enumeran a continuación:

- 1) La antigüedad relativa de toda la provincia, que es totalmente pre-brasileña e incluye varios grandes núcleos arqueanos.
- 2) La existencia de varias provincias de edad que representan cinturones móviles parcialmente superpuestos, todos ellos de carácter ensiálico y que presentan grandes exposiciones de basamento antiguo reactivado y regenerado.
- 3) La existencia de varias secuencias sedimentarias cratónicas, como las de los grupos Roraima, Beneficiente y muchos otros, varios de ellos pericratónicos con respecto a algunos de los cinturones móviles.
- 4) La existencia de gran cantidad de rocas graníticas (orogénicas en las fajas móviles, anorogénicas en las regiones estables), muchas de ellas de carácter fuertemente alcalino.
- 5) La repetición de períodos de tectonismo regional sobre las regiones estables, como reflejo del desarrollo de cada una de las fajas móviles marginales y del Meso- y Cenozoico.

También en este caso del cratón amazónico, para el establecimiento de un programa de prospección uranífera regional serían de gran utilidad los datos geoquímicos referentes a tenores de uranio en rocas graníticas (*sensu lato*), e intentar correlaciones con las provincias de edad y con regiones menores de eventual enriquecimiento primario que, consecuentemente, presentan mejor potencial para las mineralizaciones.

Finalmente, la importancia de las reactivaciones más modernas, en toda la "Plataforma Brasileira", la pone de manifiesto el caso de Poços de Caldas [40], en que la mineralización uranífera se ubica en rocas sub-volcánicas del Cretácico superior. Es posible que la fuente del uranio removilizado sea primaria, asociada al volcanismo del macizo, pero también se debe considerar como posible la hipótesis de una génesis a partir de las rocas corticales del basamento próximo, cuya edad probable es transamazónica, pero con importantes reactivaciones brasileñas.

### AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su reconocimiento a los compañeros del Centro de Investigaciones Geocronológicas de la Universidad de São Paulo, los Sres. K. Kawashita y M.A.S. Basei, y del Proyecto RadamBrasil, los Sres. W. Teixeira, C.C. Tassinari y O. Siga Jr., por el apoyo de laboratorio y por las provechosas discusiones de las ideas generales de esta trabajo. Agradece también al Dr. H. Ulbrich su atenta revisión del manuscrito y sus pertinentes observaciones.

### REFERENCIAS

- [1] DAHLKAMP, F.J., «Geochronological-metallogenic correlation of uranium mineralization», Recognition and Evaluation of Uraniferous Areas (Proc. Techn. Comm. Meeting Vienna, 1975), OIEA, Viena (1977) 131–148.
- [2] ROBERTSON, D.S., TILSLEY, J.E., HOGG, G.M., The timebound character of uranium deposits, *Econ. Geol.* 73 (1978) 1409.
- [3] KOSTOV, I., «Crystallochemical differentiation and localization of uranium ore deposits in the earth's crust», Recognition and Evaluation of Uraniferous Areas (Proc. Techn. Comm. Meeting Vienna, 1975), OIEA, Viena (1977) 15–33.
- [4] ROSCOE, S.M., Huronian rocks and uraniferous conglomerates in the Canadian Shield, *Geol. Surv. Can., Paper* 68–40 (1969) 205.
- [5] NININGER, R.D., «Recognition of uranium districts», Recognition and Evaluation of Uraniferous Areas (Proc. Techn. Comm. Meeting Vienna, 1975) OIEA, Viena (1977) 1–11.
- [6] GABELMAN, J.W., «Metallotectonic control of uranium distribution», *Uranium Exploration Geology* (Proc. Panel Viena, 1970), OIEA, Viena (1970) 187–202.
- [7] ANHAEUSSER, C.R., MASSON, R., VILJOEN, M.J., VILJOEN, R.P., A reappraisal of some aspects of Precambrian Shield Geology, *Geol. Soc. Am., Bull.* 80 (1969) 2175.

- [8] DEWEY, J.F., BIRD, J.M., Mountain belts and the new global tectonics, *J. Geophys. Res.* **75** (1970) 2625–2647.
- [9] DICKINSON, W.R., «Reconstruction of past arc-trench systems from petroTECTONIC assemblages in the island arcs of the Western Pacific», *The Western Pacific: Island Arcs, Marginal Seas, Geochemistry*, (Coleman Ed.), Univ. of Western Australia Press (1973) 569–601.
- [10] KRÖNER, The Precambrian geotectonic evolution of Africa: plate accretion versus plate destruction, *Precambrian Res.* **4** (1977) 163–213.
- [11] MOORBATH, S., The oldest rocks and the growth of continents, *Sci. Am.* (1977) 92–104.
- [12] CABRE, R., Geodynamics in the Eastern Pacific and the Western America, *Phys. Earth Planet. Inter.* **9** (1974) 169.
- [13] VICENTE, J.C., «Reflexiones sobre la porción meridional del sistema peripacífico oriental» (*Actas Conf. Solid Earth Problems*, Buenos Aires, 1970) **37 I** (1970) 158–184.
- [14] AGUIRRE, L., CHARRIER, R., DAVIDSON, J., MPODOZIS, C., RIVANO, S., THIELE, R., TIDY, E., VERGARA, M., VICENTE, J.C., Andean magmatism: its paleogeographic and structural setting in the central part (30°–35° S) of the Southern Andes, *Pacific Geol.* **8** (1974) 38.
- [15] ALMEIDA, F.F.M. de, Origem e evolução da Plataforma Brasileira, *Depto. Nac. Prod. Mineral, Rio de Janeiro, Bol.* **241** (1977) 36.
- [16] AUBOIN, J., BORRELLO, A.V., CECIONI, G., CHARRIER, R., CHOTIN, P., FRUTOS, J., THIELE, R., VICENTE, J.C., Esquisse paléogéographique et structurale des Andes Méridionales, *Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn.* **XV** 1–2 (1973) 11–72.
- [17] IRVING, E.M., La evolución estructural de los Andes más septentrionales de Colombia, *Bol. Geol. Bogotá* **19** 2 (1971) 90.
- [18] CORDANI, U.G., AMARAL, G., KAWASHITA, K., The Precambrian evolution of South America, *Geol. Rundsch.* **62** (1973) 309–317.
- [19] HURLEY, P.M., ALMEIDA, F.F.M. de, MELCHER, G.C., CORDANI, U.G., RAND, J.R., KAWASHITA, K., VANDOROS, P., PINSON, W.H.Jr., FAIRBAIRN, H.W., Test of continental drift by comparison of radiometric ages, *Science* **3988** (1967) 495–500.
- [20] CORDANI, U.G., BITTENCOURT, I., Determinações de idade potássio-argônio em rochas do Grupo Açungui – *An. Congr. Bras. Geol.* (1967) 218–233.
- [21] CORDANI, U.G., HALPERN, M., BERENHOLC, M., Comentários sobre as determinações geocronológicas da Folha Porto Alegre, Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo Folha Porto Alegre (SH-22) e Folha Lagoa Mirim (SI-22) DNPM, Brasília (1974) 70–84.
- [22] ALMEIDA, F.F.M. de, MELCHER, G.C., CORDANI, U.G., KAWASHITA, K., VANDOROS, P., Radiometric age determinations from Northern Brasil, *Bol. Soc. Bras. Geol.* **17** (1968) 3–14.
- [23] CORDANI, U.G., DELHAL, J., LEDENT, D., Orogenèses superposées dans le Précambrien du Brésil sud-oriental (Etats de Rio de Janeiro et Minas Gerais), *Rev. Bras. Geocienc.* **3** (1973) 1–22.
- [24] CORDANI, U.G., KAWASHITA, K., THOMAZ, A., «Applicability of the rubidium-strontium method to shales and related rocks», *Contributions to the Geologic Time Scale, AAPG Studies in Geology* **6** (1978) 93–117.
- [25] CORDANI, U.G., IYER, S.S., Geochronological investigation on the Precambrian granulitic terrain of Bahía, Brazil, *Precambrian Res.* (en prensa).
- [26] CORDANI, U.G., BRITO NEVES, B.B., Geocronologia do pré-Cambriano, Texto explicativo del mapa geológico del Estado de Bahía (INDA, H.A.V., BARBOSA, J.F. Eds) (1978) 32–49.

- [27] BRITO NEVES, B.B., KAWASHITA, K., CORDANI, U.G., DELHAL, J., A evolução geocronológica da Serra do Espinhaço, dados novos e integração, *Rev. Bras. Geocien.* (en prensa).
- [28] CORDANI, U.G., TASSINARI, C.C.G., TEIXEIRA, W., BASEI, M.A.S., KAWASHITA, K., «A evolução tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos» (*Actas II Congr. Geol. Chil. Santiago, 1979*) Vol. 4 (1979)
- [29] BASEI, M.A.S., Idade do vulcanismo ácido-intermediário na região Amazonica, Diss. Mestrado, Centro de Investigaciones Geocronológicas, Universidad de São Paulo (1977) 133.
- [30] CHOUBERT, B., Le Précambrien des Guyanes – Mémoires du Bureau de recherches géologiques et minières, Paris 81 (1974) 213.
- [31] HURLEY, P.M., MELCHER, G.C., PINSON, W.H., Jr., FAIRBAIRN, H.W., Some orogenic episodes in South America by K-Ar and whole-rock Rb-Sr dating, *Can. J. Earth Sci.* 5 (1968) 633–638.
- [32] PRIEM, H.N.A., BOELRIJK, N.A.J.M., HEBEDA, E.H., VERDUMEN, E.A. Th., VERSCHURE, R.H., Isotopic ages of the Transamazonian acidic magmatism and the Nickerie metamorphic episode in the Precambrian basement of Suriname, South America, *Geol. Soc. Am., Bull.* 82 (1971) 1667–1680.
- [33] GAUDETTE, H.E., HURLEY, P.M., ESPEJO, A., DAHLBERG, E.H., «Basamento arqueano al sur del Complejo de Imataca en Venezuela y Surinam» (*Mem. V Congr. Geol. Venez., 1977*) Vol. II (1977) 493–508.
- [34] GOMES, C.B., CORDANI, U.G., BASEI, M.A.S., Radiometric age determinations from the Serra dos Carajás area, Northern Brazil, *Geol. Soc. Am., Bull.* 86 (1975) 939–942.
- [35] TASSINARI, C.C.G., TEIXEIRA, W., SIGA, O., JR., «Considerações cronoestratigráficas da região das Chapadas do Cachimbo e Dardanelos» (*Anales XXX Congr. Bras. Geol., 1978*) Vol. 1 (1978) 491–505.
- [36] BARRETTO, P.M., MANTOVANI, M.S.M., CORDANI, U.G., «A evolução tectonomagmática do Território de Rondônia, por meio da interpretação dos dados radiométricos», *Resúmenes de las Comunicaciones (XXIX Congr. Bras. Geol. Belo Horizonte, 1976) Brasil* (1976) 206.
- [37] LEAL, J.W.L., SILVA, G.G. SANTOS, D.B., TEIXEIRA, W., LIMA, M.I.C., FERNANDES, C.A.C., PINTO, A.C., Levantamento dos Recursos Naturais, nº 6, Proyecto RADAM-BRASIL del Dep. Nac. Prod. Min., Brasil (1978) 184.
- [38] PRIEM, H.N.A., BOELRIJK, N.A.J.M., HEBEDA, E.H., VERSCHURE, R.H., BON, E.H., «Granitic complexes and associated tin mineralizations of "Grenville" age in Rondonia, Western Brazil», *Geol. Soc. Am., Bull.* 82 (1971) 1095–1102.
- [39] TEIXEIRA, W., Significação tectônica do magmatismo anorogênico básico e alcalino na região Amazônica, Diss. de Mestrado, Centro de Investigaciones Geocronológicas de la Universidad de São Paulo (1978) 99.
- [40] SANTOS, R., «Geology and mining development of the C-09 Uranium Deposit, Brazil», *Yacimientos de Uranio en América Latina (Actas Reun. Grup. Ases. Reg. Lima, 1978)* OIEA, Viena (en este volumen).
- [41] THOMAZ, A., CORDANI, U.G., MARINO, O., «Idades K-Ar de rochas basálticas da Bacia Amazônica, e sua significação tectônica regional» (*Anales XXVIII Congr. Bras. Geol.*) (1974) 273–278.
- [42] CORDANI, U.G., Idade do Vulcanismo no Oceano Atlântico Sul, Universidad de São Paulo, *Bol. Inst. Geoc. Astron.* 1 (1970) 9.
- [43] FORMAN, J.M.A., Uranio no Brasil: Sua busca e seus resultados, Conf. especial presentada en el XXX Congr. Bras. Geol. Recife, 1978.
- [44] ANGEIRAS, A.G., NETTO, A.M., CAMPOS, M., Mineralização fósforo – uranífera associada a epissienitos sódicos no pré-Cambriano Cearense, *Bol. Técnico Nuclebrás* (en prensa).

- [45] AYRES, J.S., «Uranium in Brazil», Yacimientos de Uranio en América Latina (Actas Reun. Grup. Ases. Reg. Lima, 1978), OIEA, Viena (en este volumen).
- [46] VINHA, C.A. da, «Métodos indirectos de prospección de uranio aplicados por NUCLEBRAS», Yacimientos de Uranio en América Latina (Actas Reun. Grup. Ases. Reg. Lima, 1978), OIEA, Viena (en este volumen).

## DISCUSSION

B. MORALES: Is there any possibility of the proterozoic cratons in the post-tectonic alkaline granites being favourable for uranium?

U.G. CORDANI: There are already various examples of post-tectonic alkaline granites in the mobile belts of the Precambrian that are favourable for uranium mineralization; the most spectacular case is that of Rössing in South Africa. For South America, certain alkaline granites from the mobile belts of the Brazilian Cycle (Upper Precambrian) do show some uraniferous occurrence; an example of this is the Acari granitoid in the northeast of Brazil.

J.A. FERNANDES: When you talk about possible Rössing-type pegmatites in the 540 million year old granites, I suppose that you are referring to pegmatites that are differentiated not inside the granite itself but in metamorphic zones of this age which were brought in by the granitization process, as occurred beyond doubt in the Rössing mine. I would like to ask, in fact, if you know of the existence of alaskites either inside the granite or in the metamorphic series of this age?

U.G. CORDANI: In principle, both types of uraniferous mineralization are possible and there are examples of radiometric anomalies recorded inside granitic bodies 450 million years old, as for example the case of Acari that I mentioned before. However, the uranium remobilizations in rocks affected by metasomatism in the neighbourhood of alkaline granites seem to form greater concentrations, as in the Espinharas deposit described by Ballhorn et al. at this meeting.

P.M. BARRETTO: With respect to the Andean chain, which is the range of ages of the granitic rocks (Santander, Arequipa, etc.) from Precambrian until the Tertiary?

U.G. CORDANI: The Andean chain is a megatectonic unit, active during the entire Phanerozoic. Several 'orogenic' cycles were recognized, each one with associated volcanism, granitic to granotioritic intrusions, and deformation in several phases or pulses. Although a complete integration along the system has not yet been achieved, it seems that the major tectonic pulses along the entire chain are more or less synchronous. Moreover, after each of these orogenic phases, granite formation occurs, in batholithic masses or in minor intrusive bodies of post-tectonic character. One or more phases are early-Palaeozoic (400–450 million years), a major orogeny occurred around 350 million years (Lower Carboniferous) and two

other pulses (about 270 and about 220 million years) are related to the Variscan orogeny. During the Meso-Cenozoic Andean Cycle at least five pulses were defined in the meridional Andes, from the Jurassic to the Miocene, all of them followed by granite intrusions (around 150 million years, 110–120 million years, 70–80 million years, 40 million years and 20 million years). In addition, Precambrian basement rocks of continental character are described in several places of the Andes, such as the Santa Marta, Santander and Garzon massifs in Colombia, the Arequipa massif of Peru, part of the Sierras Pampeanas of Argentina, and others. All these places are potential sites of uranium remobilization, with eventual formation of mineral deposits.

J. PFEIFFER: Can you say from the data available and from your own experience whether it is possible to talk about a principal magmatic period that would act as a uraniferous mobilization vehicle?

U.G. CORDANI: I do not think it is possible to indicate a special period that could be characterized in this way. Magmatic processes repeat themselves in time, with characteristics that are sometimes very similar. The formation of the deposits depends much more, in my opinion, on the existence of favourable uranium sources and of rocks susceptible to enrichment by uraniferous materials. There seems to be a greater uranium concentration in the Archean rocks and these can therefore be considered as high-potential targets. Nevertheless, the epochs for remobilization and formation of the actual uraniferous deposits can occur at any time, providing the conditions are favourable.



# THE PERMO-TRIASSIC URANIUM DEPOSITS OF SOUTHERN AFRICA WITHIN THE AFRICAN-SOUTH AMERICAN GONDWANA FRAMEWORK

P.D. TOENS, J.P. LE ROUX

Geology Division,  
Atomic Energy Board,  
Pretoria,  
South Africa

## Abstract-Resumen

### THE PERMO-TRIASSIC URANIUM DEPOSITS OF SOUTHERN AFRICA WITHIN THE AFRICAN-SOUTH AMERICAN GONDWANA FRAMEWORK.

The discovery of uranium in the Permo-Triassic Gondwana in South America and Africa has served to highlight the intercontinental correlations. The purpose here is to examine the uranium deposits of Southern Africa in the light of the similarities that exist between the various Gondwana formations of the two continents. This hopefully will assist in gaining some understanding of the genesis of the uranium mineralization and the sedimentary environment in which such deposits are likely to occur. Between the Upper Carboniferous and the Jurassic a tectono-sedimentary terrain existed within Gondwanaland in which broadly similar conditions prevailed over large areas, thus producing numerous partly disconnected basins practically identical in character. The basal formations are composed of glacial tillite followed by a succession of sandstone and shale which attains a thickness of up to 12 000 m. Sedimentological studies confirm that major source areas composed largely of granitic and metamorphic rocks existed to the north and south of central South America and Southern Africa, as also in the divides between the basins. Uranium mineralization occurs sporadically throughout the succession and is usually restricted to palaeoriver channels containing carbon trash. There has been little subsequent enrichment and the Colorado model does not apply. With a few exceptions, the deposits tend to have a low overall uranium tenor and individual deposits are usually not very extensive in size. Collectively, however, they may eventually assume some importance. Uraniferous coals have been recorded from a number of localities and it is suggested that the significance of these deposits has as yet not been fully appreciated or investigated.

### LOS YACIMIENTOS URANIFEROS DEL PERMOTRIASICO EN EL SUR DE AFRICA EN EL MARCO DEL GONDWANA DE AFRICA Y AMERICA DEL SUR.

El descubrimiento de uranio en el Permotriásico del Gondwana en América del Sur y en el sur de Africa ha servido para destacar las correlaciones intercontinentales. El propósito aquí es examinar los yacimientos de uranio en el sur de Africa a la luz de las similitudes que existen entre las diversas formaciones del Gondwana en ambos continentes. Este examen se realiza con la esperanza de lograr un mejor entendimiento de la génesis de las mineralizaciones uraníferas y del medio sedimentario en el cual será probable hallar dichos yacimientos. Entre el Carbonífero Superior y el Jurásico existió en el continente del Gondwana un terreno tectónico sedimentario

en el cual prevalecieron condiciones similares sobre extensas áreas, produciéndose así numerosas cuencas parcialmente desconectadas con características prácticamente idénticas. Las formaciones basales están compuestas de tilita glaciaria seguida de una serie de areniscas y esquistos con un espesor de hasta 12 000 m. Los estudios sedimentológicos han confirmado la existencia de zonas madre de importancia, compuestas primordialmente de rocas graníticas y rocas metamórficas, al norte y sur de la región central de América del Sur y en el sur de África, lo mismo que en las divisorias de las cuencas. Las mineralizaciones uraníferas ocurren aisladamente a lo largo de toda la serie, usualmente restringidas a cauces de paleo-ríos que contienen residuos carboníferos. El enriquecimiento posterior es escaso y el modelo del Colorado no es aplicable. Con pocas excepciones, los depósitos tienden a un tenor general bajo de uranio; en general e individualmente, los yacimientos no son muy extensos. Colectivamente, empero, pueden llegar a adquirir alguna importancia. Se han registrado carbones uraníferos en varias localidades, pero, a nuestro juicio, la significación de estos yacimientos no ha sido aun completamente apreciada o investigada.

## 1. INTRODUCTION

The discovery of uranium in the Permo-Triassic of Gondwanaland, notably in Southern Africa and South America, has served to highlight the intercontinental correlations pioneered by Du Toit [1, 2], Martin [3] and Anderson [4]. The purpose here is primarily to examine the Southern African Permo-Triassic uranium occurrences within the Gondwana framework. This hopefully will lead to a greater appreciation of the similarities that exist between the various Gondwana formations, and to some understanding of the genesis of the associated uranium mineralization.

Between the Upper Carboniferous and the Jurassic a tectono-sedimentary terrain existed within Gondwanaland, in which broadly similar tectonic and sedimentary conditions prevailed, essentially simultaneously, over large tracts producing numerous partly disconnected basins practically identical in character.

This great succession attains a thickness in Africa of up to 12 000 m. The basal formations are composed of a thick succession of glacial conglomerate or tillite. This is followed by strata consisting largely of sandstone and shale exhibiting shallow marine to lacustrine or swamp to deltaic or flood plane conditions. The succession is capped by lavas of basaltic or rhyolitic composition ranging in age from Jurassic to Cretaceous.

Fossils indicate that this continuous succession ranges in age from Upper Carboniferous into the Lower Jurassic and in absolute time extends from say 200 to 300 million years (m.y.), a period which not only covers several of the recognized successions of Europe, but straddles the Palaeozoic and Mesozoic eras [2, 5]. Gondwana sediments and volcanics have been identified in most countries in Africa south of the Sahara and in South America, as also in the Falkland (Malvinas) Islands, Antarctica, Malagasy, peninsular India and Australasia.

It should be noted that while most of the basins referred to above are bottomed by tillite, practically all contain coal and uranium, often in important concentrations. Oil in only minor economic concentrations has been encountered in Brazil and South Africa, and only in Brazil has an important oil shale been located.

## 2. PERMO-TRIASSIC GONDWANA BASINS OF SOUTH AMERICA AND AFRICA

In late Palaeozoic times ice caps occupied most of Gondwanaland and, as they retreated, large bodies of cold water, some interconnected, covered the stable platform. The climatic changes that followed produced vegetated environments along the margins of the many bodies of water, some of which may have been open to the sea. The delicate balance of environments produced a complexity of cycles of sedimentation, erosion and redeposition, to form the impressively large Permo-Triassic deposits of Gondwanaland.

The faunas, which developed in the colder climate, can be distinguished from the 'Tethyan' faunas which indicate a warm climate (Fig. 1). Starting in the Early Permian the climate became warmer and more arid conditions prevailed in the Late Permian and Triassic. The depositional cycle was terminated by the development of basaltic and rhyolitic effusives during the Jurassic and Cretaceous periods [6, 7].

Structurally, most of Gondwanaland remained remarkably stable during the Permo-Triassic, and even the tectonically active Cape Fold Belt and its South American extension, south of the Paraná Basin (which also constituted a major source area) produced remarkably few structural effects. Similar tectonic and sedimentary conditions prevailed, essentially simultaneously, over large areas of Gondwanaland and, as the provenance areas were geologically similar, many of the basins are practically identical in character. They thus constitute a tectono-sedimentary terrain of considerable dimensions [8]. The major Permo-Triassic Gondwana basins and adjoining source areas in Africa and South America are illustrated in Fig. 1. It must be appreciated that the source areas were never static and the illustration presented is intended only to indicate in broad outline the position during the early Permian [4, 9, 10].

Sedimentological studies confirm that one of the major source areas appears to have been a large metamorphic or granitic terrain situated to the south and east of South Africa and occupying eastern Argentina and possibly southern Uruguay. The Cape Fold Belt and its South American equivalent adjoined this provenance area [3, 11, 12].

Studies have indicated that this postulated landmass constituted the source for the sediments of the main Karoo Basin, the Paraná Basin and its western extensions, as also the basins of Argentina [7, 13-15].



A similar large landmass is postulated to have existed to the north of the Congo and Kenya and the Paraná and Bolivian Basins to constitute the current northern limit of the Permo-Triassic Gondwana province [13, 16]. Topographic highs of lesser extent separated individual basins in Africa and South America. They are well defined and adequately documented in the literature [11, 17, 18].

### 3. KAROO SUPERGROUP AND ITS SOUTH AMERICAN EQUIVALENTS

#### 3.1. General

A brief summary description of the Karoo supergroup of the type area in the Cape Province, South Africa, is given, together with relevant remarks pertaining to intercontinental correlations and the location of uranium mineralization. A stratigraphic column (Fig. 2) is presented, as well as a generalized column (Fig. 3) prepared by J.M. Anderson, showing the South American and South African correlation against the standard stratigraphic stages and radiometric time scale after Anderson and Schwyzer [5].

#### 3.2. Dwyka group

Towards the close of the Carboniferous, but mainly during the Lower Permian, major ice sheets developed in various elevated parts of Gondwanaland. From these highlands radiating lobes advanced towards the marine-shelf environment where up to 1000 m of glacial sediments accumulated. There is evidence of two glacial phases separated by an interglacial phase, the latter being represented by carbonaceous shale or coal of poor quality [19]. As in the overlying Ecca group the presence of *Glossopteris* flora is ubiquitous.

In Namibia the low-grade interglacial coal present in some localities has been explained as being due to the redeposition of morainic material long after the termination of the glaciation [3]. In South America the equivalent of the Dwyka Formation is well developed in the Paraná Basin in southern Brazil, Uruguay and northeastern Argentina where it is known as the Itareré subgroup.

On the Skeleton coast in northern Namibia primary uranium mineralization occurs sporadically within the tillite and overlying shales. The deposit is, however, of little importance.

#### 3.3. Ecca group

A marine incursion succeeded the final retreat of the ice sheets during the early Permian, occupying large parts of Gondwanaland. In Southern Africa this continental sea was possibly connected to the oceans by narrow straits situated near

Brazilian Equivalent*		Period	Stratigraphic column	Group	Sub-group	Formation		Fossils, Biozonation	Uranium/Thorium	Lithology							
SÃO BENTO	Cretaceous in Namibia and Brazil	Jurassic		Drakensberg (1 300 m)						Volcanics (basalt)							
	Santa Maria	Triassic		Stormberg (1 200 m)		Clarens		Dinosaurs	U XXX XXX XXX	Sandstone, subordinate mudstone							
	Elliot				Dicroidium	Red sandstone and mudstone											
HIATUS					Molteno			Fluvial. Sandstone, mudstone and coal.									
PASSA DOIS	Rio Do Rasto					Beaufort (3 000 m)	Tarkastad	W Undifferentiated		E Burgersdorp	Cynognathus	U XXX XXX XXX XXX XXX XXX	Fluvio-deltaic Sandstone and mudstone (grey-green to red), subordinate volcanics				
		Katberg	Lystrosaurus														
	Estrada Nova		Adelaide	W Undifferentiated			E Balfour	Middleton	Daptocephalus								
								Abrahamskraal	Cistecephalus								
									Koonap	Tropidostoma							
									Tapinocephalus								
								(Iratil)		Ecca (3 000 m)	Waterford			Glossopteris  Gangamopteris	Th XXX XXX XXX XXX XXX	South (marine) Mudstone and sandstone, carbonaceous shale and tuff (?)  North (marine and fluvio-deltaic) Mudstone and sandstone. Coal measures in fluvio-deltaic Middle Ecca	
											Fort Brown						
											W Laingsburg						E Ripon
	Collingham																
	Whitehill (White Band)																
	Prince Albert																
	TUBARÃO	Palermo	Carboniferous				Dwyka (600 m)							U XXX XXX	Glacial. Diamictite, varved shale, fluvio-glacial gravel and conglomerate		
Rio Bonita																	
Itararé																	

FIG.2. Stratigraphy of the Karoo supergroup in the southern Karoo Basin, South Africa.

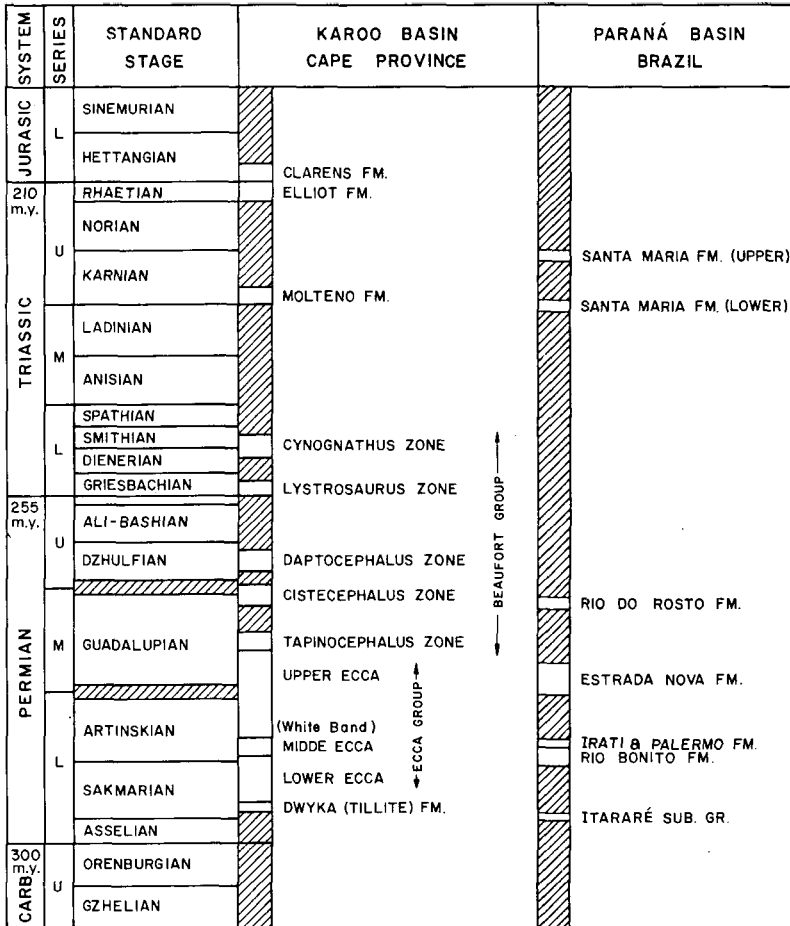


FIG.3. Comparative stratigraphic column showing generalized succession in Paraná and Karoo Basins.

the present position of the Orange River mouth and in the southeastern portion of the basin [20]. A restricted environment is also indicated by the lack of Permian marine fauna and the rather low salinity of the sediments. In the south, flysch-type sediments accumulated in the rapidly subsiding Karoo trough, with currents flowing north and eastwards from a source situated south of the present Cape Fold Belt. Relief in these highlands was high during Lower Eccla times, relatively low during Middle Eccla times, and very pronounced during Upper Eccla times.

The western Ecca facies was derived from a granitic provenance to the west and southwest of the trough, and accumulated on unstable shelf areas along the western margins and in the western portion of the Karoo trough [21]. During Lower Ecca times relief in the western highlands was low, and deep water environments prevailed in the adjacent trough, but in Middle Ecca times this area was actively uplifted and fluvial-deltaic conditions dominated. Sedimentation apparently did not take place north of latitude  $27^{\circ}$  or over the mildly positive Clocolan Dome east of Lesotho during the Early Permian, but subsidence of the craton spread progressively northwards and resulted in a major transgression in that direction. The major source area lay to the east and northeast of the present Natal coast, but the Witwatersrand Arch and the Clocolan Dome continued to act as subordinate source areas. During Middle Ecca times a southward regression, interrupted by minor transgressions, caused fluvio-deltaic conditions in the northern third of the basin, with coal swamps developing in favourable areas. This was followed by another major transgression resulting in relatively deep water and reducing conditions. Similar environments prevailed in the eastern and central portions of the Karoo Basin throughout Ecca times. In the latter area the central Ecca facies constitutes an inter-mixture of the fine-grained equivalents in the northern, western and southern Ecca facies [20]. It attains a thickness of 10 000 m near the southern margin.

Uranium mineralization in the Ecca in Southern Africa is usually associated with, or occurs in the vicinity of, coal seams. Such occurrences have been noted in Zambia, Malawi, Botswana [22] and the Springbok Flats of the Transvaal. In Angola near Melange uranium occurs in finely laminated fossiliferous sandstone 100 m above the Dwyka tillite.

It is of interest to note that in the predominantly fluvio-deltaic Middle Ecca of the northern facies, deposits of fossil-heavy mineral beach sands containing monozite occur. They probably represent erosional products of the Witwatersrand and other Precambrian formations and were formed by shore line processes, such as the reworking of delta-front sands, during periods of temporary marine transgression [23, 24].

The Ecca group is easily identifiable in South America. The Lower and Middle Ecca is correlated with the Rio Bonita Formation of the Paraná Basin, which also contains deposits of coal as well as a number of uranium deposits, notably the Figueira deposit of Brazil [25] and the Sierra Pintada deposits of Argentina [26–28]. The Upper Ecca is represented by the Estrada Nova Formation in the Paraná Basin, according to Anderson's classification (Fig. 3). Of great significance is the intercontinental identification of the so-called White Band or Whitehill Formation. This carbonaceous band, known as the Irati in South America, is characterized by the presence of the free-swimming reptile *Mesosaurus* and provides an excellent date line when correlating across the Atlantic. As illustrated (Fig. 4), it is seen to extend over most of the southern Karoo, Namibia and the Paraná Basin [29].

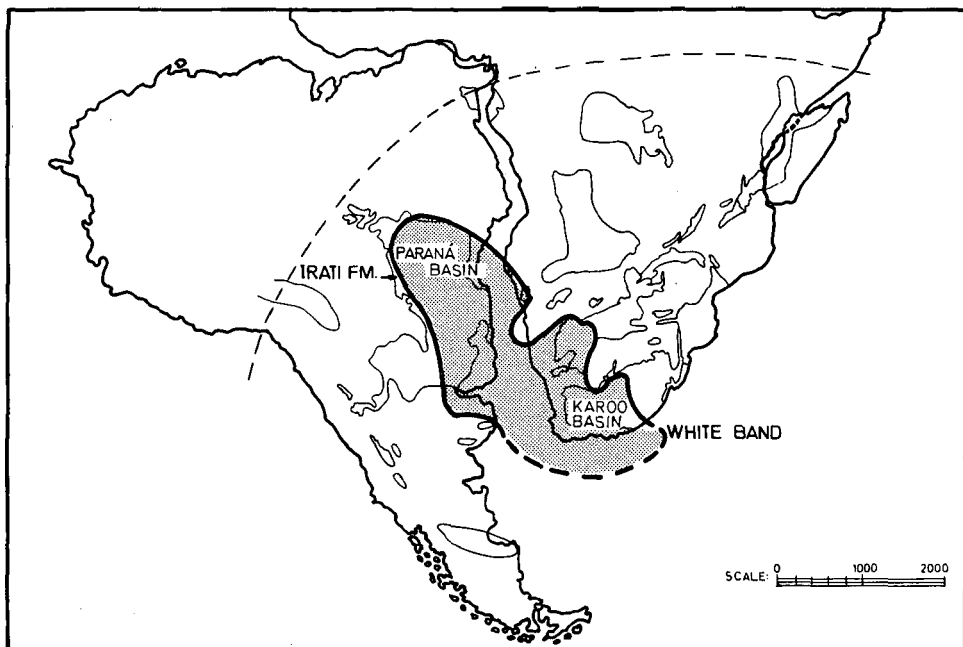


FIG.4. Map showing distribution of White Band/Irati Formations in Southern Africa and South America.

### 3.4. Beaufort group

The Beaufort group was deposited from the Middle Permian to Early Triassic times as a fluvio-deltaic assemblage. Sedimentation probably started as deltas which coalesced into an ever-broadening northward prograding coastal plain. Throughout Southern Africa, Beaufort sedimentation was marked by low-energy conditions [11].

In the southern Karoo it follows the Eccla conformably, to the north, however, sedimentary overlap takes place, so that progressively younger Beaufort Beds rest disconformably on what is taken on lithological grounds to be the Upper Eccla. Ryan and Whitfield [24] point out that on a regional scale it should be clearly understood that these beds are not isochronous. Palaeontological evidence confirms this as progressively younger vertebrate fossils are found in these beds the further north one proceeds (Fig. 5). It is therefore to be expected that the topmost beds of the Eccla group in the northern part of the Karoo Basin are the chronostratigraphic equivalents of the lowermost Beaufort Beds in the south, and that the lowermost Beaufort Beds in the north of the basin are in fact the chronostratigraphic equivalent of the higher Beaufort sequence of strata in the south.

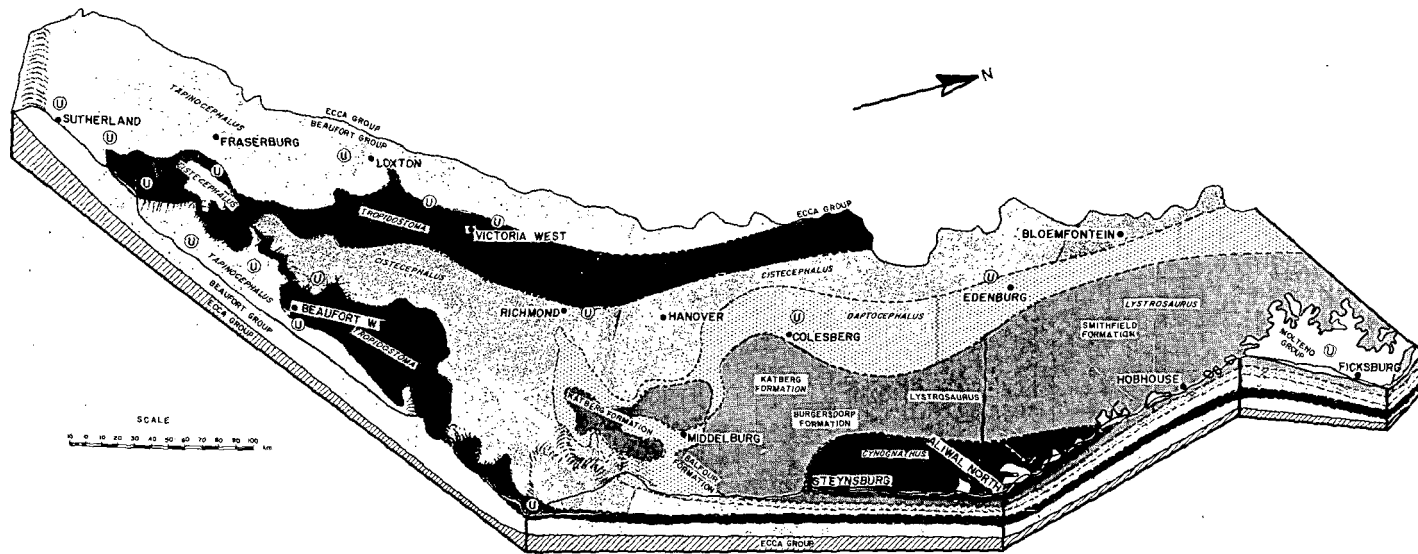


FIG.5. The Beaufort (Permian) Basin of Southern Africa showing location of uranium deposits and biozonation.

The Beaufort group (and its sub-divisions) thins in a northerly direction and is not represented in Namibia or in the southeastern Transvaal, although it extends through into northern Zululand. It re-appears to the north of Bulawayo, where, in the trough of the Zambezi from Wankie northeastwards, are to be found the comparable Madumabisa Shales with similar fossils. It is also present in Malawi, having in places a distinctly calcareous facies.

The Beaufort group has a maximum thickness of 3000 m in the southern Cape and is composed throughout of a monotonous sequence of shales and mudstones with interbedded sandstones. The argillaceous rocks are rather dull in colour: red, purple, blue, green, while the sandstones normally weather to a yellowish colour and are often feldspathic. In the Cape Province, sedimentological studies carried out by Theron [30] indicate a source area for the uraniferous Beaufort sediments somewhere to the south of the present-day southeasterly rim of the Beaufort Basin. The abundance of feldspathic sandstones in the lower part of the Beaufort suggests that the pre-Cape granites and older metasediments in all probability constituted the source rocks.

In the southern Karoo, from the Middle Beaufort times onwards, there is evidence in the form of coarser fragments, indicating that the Cape Fold Belt, rather than any granite area further to the south, had become the southern source area.

In the southeast, off the present East London coast, a large delta was located from which a fan-shaped distributary carried sediment into the eastern and northern parts of the basin [30]. This is in accordance with studies carried out by Greenshields [31] along the Transkei coast, and suggests the presence of a strongly positive source area in a position where the axis of the Karoo trough was located in Ecca times [20]. The axis must therefore have advanced still farther to the north, bringing the Southern Highlands closer to the present coast. In the western part of the basin current directions are more randomly distributed, with lower vector strengths, which probably indicates an embayment where quiet conditions existed.

Hundreds of uranium occurrences have been located in the Beaufort group since investigations commenced in 1969 [32; 33]. The more important occurrences have been discovered in a broad belt stretching for 300 km from Beaufort West in the east to Sutherland in the west. In this area it has been shown that many of the uranium deposits occur close to the biostratigraphic boundary between the *Cistecephalus* and *Tapinocephalus* assemblage zones (Fig. 2 and Refs [34, 35]). However, as has already been pointed out, the beds are not isochronous and proceeding northwards from the more important Beaufort West/Sutherland zone, the uranium deposits occur progressively higher up in the succession until eventually, near the northwestern Lesotho border, they occur in the overlying Molteno Formation and present a classical diachronous relationship of lithostratigraphic facies with time (Fig. 5).

The Beaufort group, so well developed in the main Karoo Basin of South Africa, appears to be very poorly developed (if at all) in South America. However,

due to the gradual transition between the Eccra and the Beaufort groups, the possibility does exist that it has as yet not been recognized as a separate entity. Recent investigations (J.M. Anderson, personal communication) have recorded the presence of the *Cistecephalus* zone in Brazil within the Rio do Rastro Formation. The equivalent of the Beaufort group may also be present in Argentina [36]. Due to the important uranium potential of the Lower Beaufort in the Cape Province, a search for its equivalent may be justified in South America and in Africa where it has as yet not been identified.

### 3.5. Stormberg group

The term Stormberg is no longer used; however, it does serve to group the Upper Triassic sediments of the Karoo supergroup (Fig. 2).

The Molteno Formation was deposited as fluvial sediments in an intracratonic clastic wedge during Middle to Upper Triassic times [21, 37]. Braided streams drained the distal slopes of an alluvial fan system towards the northwest, where the formation rapidly thins between the floodplain-lacustrine sediments of the Beaufort group and the Elliot Formation. This area probably forms part of an interior drainage system remote from any marine shoreline [38]. Current-direction studies imply the operation of two flow systems within the basin, directed towards the northwest and north-northeast and controlled by diastrophic pulses in the source areas, located in the south and southeast respectively. These systems probably united in Lesotho and from there flowed northwest along the basin axis.

During this period the Lower Karoo strata must have been denuded off the crests of the rising folds of the Cape Fold Belt, for boulders derived from the older Cape group are characteristic of the Molteno grits, becoming more numerous and also larger as the outcrops of the latter are traced towards the south. In the region still further to the south the pre-Cape granites were exposed and so furnished the feldspathic matter for the Molteno and Red Bed sandstones. Uranium has been reported to occur in the Molteno Formation on either side of the northwestern border of Lesotho, and in the Escarpment grits in Zambia, Rhodesia (Zimbabwe), Kenya, Tanzania and in the equivalent of the Red Beds in Madagascar (J. Cameron, personal communication).

Towards the end of the Triassic the climate became more arid and the Elliot Formation accumulated in shallow-water alluvial flats in a continental environment [21]. These brightly coloured sediments also had a southerly source which probably remained basically similar to that operative during deposition of the Molteno Formation. The Clarens Formation, Late Triassic in age [18], is mainly an aeolian deposit, with small water-bodies in which fish and crustacea lived [39]. Palaeowind data indicate that the source area must have been situated to the west of the present outcrop area [40]. The effusion of volcanics of the Drakensberg group commenced in Early Jurassic times with pyroclastic rocks and basalt derived from

discrete volcanic centres, followed by fissure-vent effusions of highly mobile lava [41]. In Namibia and South America, the overlying volcanics are of Cretaceous age [42].

The old Stormberg group, now the Molteno, Elliot and Clarens Formations, is represented by the Upper and Lower Santa Maria Formations in the Paraná Basin (Fig. 3 and Refs [3, 43] and Anderson, personal communication).

As in Namibia, in South America the aeolian sandstones and volcanics of the Cretaceous transgress with a marked unconformity over the different stages of the Permo-Triassic and older formations [42]. The hiatus must, to a considerable extent, be due to erosion, and Martin [3] postulates that this widespread Triassic unconformity was caused by the epiorogenic movements which accompanied the folding of the Cape mountains, the Sierra de la Ventana of Argentina and the minor granitic intrusions in the Andes.

The Jurassic and later sediments are not discussed but it should be noted that many of the uranium deposits of Argentina are of Cretaceous age and can therefore not be compared directly with those of the Karoo of Africa.

#### 4. PROVENANCE AREAS

The composition and extent of the source areas during deposition of the Karoo sequence is highly important, as this may provide a key to the widespread uranium mineralization within the Permo-Triassic Gondwana basins. Considering that the sediments within the main Karoo Basin of South Africa alone cover more than 600 000 km<sup>2</sup> and attain a maximum thickness of over 12 000 m, the volume of rock through which uranium occurs is enormous when seen in the context of Gondwana sedimentation, and this certainly suggests some unifying feature, making the sequence as a whole favourable for uranium mineralization. It should be noted that in the evolution of the Karoo Basin, the major source areas to the east, south and west thereof were characterized by repeated uplift and denudation following periods of quiescence.

In summary, the provenance of the Karoo sequence as a whole consisted primarily of granitic, pegmatitic and metamorphic rocks, with some contribution from volcanic centres in the south [44] and the Cape Fold Belt. The dominance of garnet as an accessory heavy mineral in all the sandstones indicates a common parent [30] and leads to further evidence for the origin of the sediments. The U/Pb dating of zircon separated from the lower Beaufort sandstone yielded an age of 1050 m.y. [33] which is roughly of the same order as the Namaqualand Metamorphic Complex and the Natal Granitic Basement ( $\pm$  1000 m.y.). Both areas have comparable rock types which contain garnet as a common accessory mineral, while pegmatites also occur in both basement complexes. It must therefore be concluded that the Karoo Basin developed in a vast Precambrian basement

which continues underneath the Karoo cover and extends far beyond the present confines of the subcontinent.

As regards the origin of the Karoo uranium, granitic and pegmatitic rocks can be considered the most likely sources, as enormous volumes of this material were shed into the basin during Karoo times. Moreover, these rocks remained in relative close proximity to the overlying sequence, and other mechanisms of uranium introduction from these sources into the overlying sediments should not be discarded entirely. Although a small contribution of uranium from the volcanic horizons might be possible, their volume in comparison with that of the sediments is almost negligible, and, combined with their restricted occurrence in the south of the basin, this renders them unlikely as the main source of uranium in the Karoo.

## 5. URANIUM MINERALIZATION

In the Karoo Basin of South Africa the more significant finds of uranium up to now have been restricted to the Lower Beaufort group in the Cape Province, but exploration activities have recently expanded to the east and north, and currently include the Molteno Formation of the Stormberg group. Reports of uranium finds in Jurassic rhyolites of the Drakensberg group in Lesotho have also been received. Except for the latter, which have not been investigated by South African geologists, the manner of occurrence of the Karoo uranium is very similar throughout the Karoo Basin.

In general, the mineralization is restricted to coarser sediments such as sandstone and mud-pebble conglomerate. The uranium occurs as stacked, tabular lenses or pods commonly arranged in zones along palaeoriver channels. Thick sandstones seem to be the most favourable hosts and, where several sandstone units occur in vertical sequence, the uranium may be present in more than one unit despite the intercalation of relatively impermeable mudstones. Within the sandstones, however, the mineralization is generally controlled by the presence of permeable zones and internal erosion surfaces, which provide passageways for fluid migration. These permeable horizons often occur near the base of the sandstones and represent the upper flow regime of deposition, resulting in horizontal discontinuous lamination or low-angle crossbedding, and mud-pebble conglomerate deposited as channel lag. As plant material is generally concentrated in these thalwegs, the combination of permeability and the presence of a reducing agent provides a perfect environment for uranium deposition.

There is no doubt that ore fluids supplied or reconcentrated the uranium, as many uraniferous lenses cut discordantly across lithological boundaries. Evidence of wall-rock alteration is also widespread. Typical examples of this are the bleached, haematite-stained appearance of many mineralized sandstones, and the highly calcareous matrix of others.

The first type often occurs along fracture systems and is probably the result of groundwater flow remobilizing uranium present in the sediments, as secondary minerals such as metazeunerite, metatorbernite, carnotite and meta-autonite are commonly concentrated along bedding planes or joint surfaces. The second type manifests itself by a typical black colour upon weathering, which is the result of a thin MnO coating on surface. This probably results from the capillary diffusion of groundwaters towards the surface, as the colour is observed only on flat outcrops or on concretions in cliff sections. The calcareous matrix, however, probably represents a gangue mineral of the original ore solutions, as primary uranium minerals such as uraninite and coffinite, are associated with these occurrences. This 'primary' ore type may be developed in fissile or massive sandstone or in mud-pebble conglomerate in the vicinity of permeable zones.

The ultimate origin of the ore solutions at this stage is uncertain, but a hydrothermal telethermal genesis is possible. This is substantiated by the association of the uranium with base-metal sulphides of, for example, Mo, Cu, As, Se and Pb, and by the minor silification, pyritization and argillization commonly observed. The uranium may have been derived from the Precambrian basement granites (1050 m.y.), which acted as source rocks for the whole Karoo supergroup, or from volcanic horizons within the sediments. Although the latter have rarely been identified as such, the anomalously high plagioclase content of the sandstones may reflect acidic volcanism contemporaneous with sedimentation (L. Haynes, personal communication). Volcanism of Permian age is known to have occurred in present day Patagonia and western Antarctica, both of which could have acted as source areas during deposition of the Karoo supergroup.

## 6. CONCLUSIONS

It is only in recent years that the possible ultimate uranium potential of the Permo-Triassic Gondwana sediments has been recognized in Africa and South America. However, to date no concerted effort has been made to understand, or appreciate, the parameters which control the concentration of uranium in this vast tectono-sedimentary province.

It would therefore appear that much could be gained in fully assessing the sedimentary environments in which the known deposits occur in order to gain a better understanding of the genesis of the mineralization and the composition of the provenance areas. These criteria could then be applied to the virgin areas in the less-explored regions in an effort to narrow the search.

Investigations carried out in South Africa to date indicate that the mineralization tends to be restricted to palaeoriver channels, in which thick sandstone lenses and mud-pebble conglomerates, containing carbon trash, constitute a favourable environment for the formation of uranium deposits [8, 33]. As a rule,

roll-front conditions do not exist and the Colorado model cannot be applied. The uranium grades therefore tend to be of a low tenor, the deposits ill defined and difficult to delineate and evaluate. The nature of the deposits is often such that it may take a number of smaller deposits to constitute a viable unit.

As the ores are usually not refractory, serious metallurgical problems do not arise, and either acid or alkaline leach techniques may be applied depending on the amount of carbonate present.

It is also possible that the uraniferous coals have been neglected and serious attention should be given to an appreciation of the environmental conditions which gave rise to them and other associated deposits. Cognizance should also be taken of the fact that uranium values often increase as the quality of the coal decreases, and attention should be given to those peripheral areas where prospecting for coal is usually discontinued.

## 7. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to acknowledge the assistance of J.M. Anderson and I.R. McLachlan for assistance in the compilation of the various text figures and for useful discussions. Thanks are also due to L. Haynes and F. Camisani-Calzolari for critically reviewing the manuscript and for many helpful suggestions.

## REFERENCES

- [1] DU TOIT, A.L., A Geological Comparison of South America with South Africa, Carnegie Institution, Washington DC, Publication No. 381 (1927).
- [2] DU TOIT, A.L., Our Wandering Continents, Edinburgh (1937).
- [3] MARTIN, H., The hypothesis of continental drift in the light of recent advances of geological knowledge in Brazil and in South West Africa, Alex du Toit Memorial Lecture Annex, Geol. Soc. S. Afr. **64** (1961).
- [4] ANDERSON, J.M., The biostratigraphy of the Permian and Triassic, *Palaeontol. Afrikana* **16** (1973).
- [5] ANDERSON, J.M., SCHWYZER, R.U., The geostратigraphy of the Permian and Triassic. Part 4: Palaeomagnetic evidence for large-scale intra-Gondwana plate movements during the Carboniferous to Jurassic, *Trans. Geol. Soc. S. Afr.* **80** (1977).
- [6] LAWRENCE, A.F., ARTURO, J.A., CROWELL, J.C., "Origin and stratigraphy of Late Palaeozoic diamictites in Argentina and Bolivia", *Gondwana Stratigraphy Symp.* Buenos Aires, 1967.
- [7] ROCHA-CAMPOS, A.C., "Upper Palaeozoic and Lower Mesozoic palaeogeography and palaeoclimatological and tectonic events in South America", *The Permian and Triassic Systems Mem.* 2 (LAGON, A., HILLS, L.V., Eds), *Can. Soc. Petrol. Geol.* (1973).
- [8] PREMOLI, C., (1977) "Metallogeny of radioactive raw materials of Madagascar", *Uranium Deposits in Africa: Geology and Exploration* (Proc. Regional Advisory Group Meeting Lusaka, 1977), IAEA, Vienna (1979) 41.

- [9] MACHADO, C.R., "Gondwana coal in Southern Brazil", Proc. 3rd Gondwana Symp. Canberra, 1973 (CAMPBELL, K.S.W., Ed.) (1973).
- [10] CROWELL, J.C., FRANKS, L.A., "The late palaeozoic glaciation", Proc. 3rd Gondwana Symp. Canberra, 1973 (CAMPBELL, K.S.W., Eds.) (1973).
- [11] RUST, I.C., "Tectonic and sedimentary framework of Gondwana Basins in Southern Africa", Proc. 3rd Gondwana Symp. Canberra, 1973 (CAMPBELL, K.S.W., Ed.) (1973).
- [12] McLACHLAN, I.P., ANDERSON, A.M., "The age and stratigraphic relationship of the glacial sediments in Southern Africa", Proc. 3rd Gondwana Symp. Canberra, 1973 (CAMPBELL, K.S.W., Ed.) (1973).
- [13] SALAMUNI, R., BIGURELLA, J.J., Problems in Brazilian Gondwana Geology (BIGURELLA et al., Eds) (1967).
- [14] MARTIN, H., "Structural and palaeogeographical evidence for an Upper Palaeozoic sea between Southern Africa and South America", Proc. 3rd Gondwana Symp. Canberra, 1973 (CAMPBELL, K.S.W., Ed.) (1973).
- [15] KEMP, M.K., "The palynology of Late Palaeozoic glacial deposits of Gondwanaland", Proc. 3rd Gondwana Symp. Canberra, 1973 (CAMPBELL, K.S.W., Ed.) (1973).
- [16] BORRELLO, A.V., "Recursos Minerales de la Republica Argentina: III. Combustibles solidos minerales", Rev. Museo. Argent. Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia, Cienc. Geol. V (1954).
- [17] HAUGHTON, S.H., Stratigraphic History of Africa South of the Sahara, Oliver and Boyd, Edinburgh (1961).
- [18] ROMAR, G., "Intercontinental correlations of Triassic Gondwana vertebrate faunas", Proc. 3rd Gondwana Symp. Canberra, 1973 (CAMPBELL, K.S.W., Ed.) (1973).
- [19] HAUGHTON, S.H., The geological history of Southern Africa, Geol. Soc. S. Afr. Special Publication (1969).
- [20] RYAN, P.J., Some conclusions drawn from a basinal analysis of the Ecce Series in the Karoo Basin, Palaeontol., Afrikana 11 (1968).
- [21] TRUSWELL, J.F., An Introduction to the Historical Geology of South Africa, Purnell, Cape Town (1970).
- [22] WHITESIDE, H.C., Discussion on paper by Von Backström, J.W. "Uranium deposits in the Karoo Supergroup near Beaufort West, Cape Province, South Africa", Formation of Uranium Ore Deposits (Proc. Symp. Athens, 1974), IAEA, Vienna (1974) 419.
- [23] VON BACKSTRÖM, J.W., "Thorium", Mineral Resources of the Republic of South Africa (COETZEE, J., Ed.), Government Printer, Pretoria (1976).
- [24] RYAN, P.J., WHITFIELD, Basinal analysis of the Ecce and Lowermost Beaufort Beds and associated coal, uranium and heavy mineral beach sand occurrences, Geol. Soc. S. Afr. Special Publication (1978).
- [25] RAMOS, A.J.R. de A., FRAENKEL, M.O., "Uranium occurrences in Brazil", Formation of Uranium Ore Deposits (Proc. Symp. Athens, 1974), IAEA, Vienna (1974) 657.
- [26] STIPANICIC, P.N. et al., "Provincias uraníferas, Argentinas", Peaceful Uses of Atomic Energy (Proc. Int. Conf. Geneva, 1955) Vol. 7, UN, New York (1955).
- [27] STIPANICIC, P.N., et al., "Depósitos uraníferos Argentinos con control sedimentario", 4th Int. Symp. Peaceful Appl. Nuclear Energy, Mexico (1962).
- [28] STIPANICIC, P.N. et al., "Conceptos geoestructurales generales sobre la distribución de los yacimientos uraníferos con control sedimentario en la Argentina y posible aplicación de los mismos en el resto de Sudamérica", Uranium Exploration Geology (Proc. Panel Vienna, 1970), IAEA, Vienna (1970) 205.
- [29] ANDERSON, A.M., McLACHLAN, I.R., The oil-shale potential of the Permian White Band Formation, South Africa, Trans. Geol. Soc. S. Afr. (1978).

- [30] THERON, J.C., "A palaeocurrent analysis of a portion of the Beaufort Series, Karoo System", Proc. 1st Gondwana Symp. Mar del Plata, 1967 (AMOS, A.J., Ed.) (1967).
- [31] GREENSHIELDS, H.D., A palaeoenvironmental analysis of the Beaufort Group along the Transkei and parts of the Ciskei coast, unpublished MSc Thesis, University of Natal, Durban, 1978.
- [32] VON BACKSTRÖM, J.W., "Uranium deposits in the Karoo Supergroup near Beaufort West, Cape Province, South Africa", Formation of Uranium Ore Deposits (Proc. Symp. Athens, 1974), IAEA, Vienna (1974) 419.
- [33] MOON, C.J., "A geological appraisal of the uranium mineralisation in the Karoo System, South Africa", Recognition and Evaluation of Uraniferous Areas (Proc. Techn. Comm. Vienna, 1975), IAEA, Vienna (1977) 241.
- [34] KEYSER, A.W., Vertebrate biozonation of the Beaufort Group with special reference to the Western Karoo Basin, Open File Report No. 36, Geol. Surv. S. Afr. (1977).
- [35] KITCHING, J.W., "A short review of the Beaufort zoning in South Africa", Proc. 2nd Gondwana Symp. Pretoria, 1970 (HAUGHTON, S.H., Ed.), CSIR, Pretoria (1970).
- [36] SILL, W.D., The tetrapod-bearing continental Triassic sediments of South America, Am. J. Sci. 267 (1969).
- [37] PLUMSTEAD, E.P., Three thousand million years of plant life in Africa, Alex du Toit Memorial Lecture No. 11, Annex, Geol. Soc. S. Afr. 72 (1969).
- [38] TURNER, B.R., Fluvial cross-bedding patterns in the Upper Triassic Molteno Formation of the Karoo (Gondwana) Supergroup in S.A. and Lesotho, Trans. Geol. Soc. S. Afr. 80 Part 3 (1977).
- [39] DU TOIT, A.L., The zones of the Karoo System and their distribution, Proc. Geol. Soc. S. Afr. 21 (1918).
- [40] BEUKES, N.J., Die sedimentologie van die Étage Holkranssandsteen Sisteem Karoo, unpublished MSc Thesis, University of the Orange Free State, Bloemfontain, 1969.
- [41] LOCK, B.E., JOHNSON, M.R., A crystal tuff from the Eccia Group near Lake Ments, eastern Cape Province, Trans. Geol. Soc. S. Afr. 77 3 (1974).
- [42] SIEDNER, G., MILLER, J.A., K-Ar determination on basaltic rocks from South West Africa and their bearing on continental drift, Earth Planet. Sci. Lett. 4 6 (1968).
- [43] MACHADO, C.R., "Problems in Brazilian Gondwana geology", Proc. 1st Gondwana Symp. Mar del Plata, 1967 (AMOS, A.J., Ed.) (1967).
- [44] MARTINI, J.E.J., The presence of ash beds and volcanic fragments in the greywackes of the Karoo System in Southern Cape Province, South Africa, Trans. Geol. Soc. S. Afr. 77 2 (1974) 113.

## DISCUSSION

J. TAYLOR: Do you have any indication of uranium enrichment in the source rocks for the Beaufort group?

P.D. TOENS: We have no direct evidence except that the U/Pb dating of zircon separated from the Lower Beaufort sandstone yielded an age of 1050 m.y. This is the same order as the Namaqua Metamorphic Complex which contains granitic rocks which are uraniferous in some localities.

J. TAYLOR: Regarding your question about uranium mineralization in tillites, we have established the occurrence of very small quantities of uranium with tillites at the base of the carboniferous in Bolivia.

P.D. TOENS: I am certainly interested in your comment and would suggest that interglacial sediments have thus far been neglected and probably deserve greater attention.

F.B. TONA: Can you give us economic data on the deposits of the Beaufort Formation?

P.D. TOENS: No, I am afraid not at this stage. What I can say, however, is that a number of medium-to-small-sized deposits are currently being investigated in some detail and that it will be some years before a final assessment can be made. There are also many small deposits which we hope will eventually become collectively viable.

P.M. BARRETTO: Your comments on the association of uranium with coal, carbon trash and sandstone lenses of palaeoriver channels are very interesting. I am sure our colleagues from Brazil could comment better than I on an apparently similar situation in the Permo-Carboniferous sediments of the Paraná Basin. There, the lower Permian shows fluvial-lacustrine sediments with carbon trash, shale (Itararé Formation), palaeochannels, coal horizons, black shale, calcareous lenses (Rio Bonito Formation). Uranium presence has been found in several stratigraphic positions, but real mineralization so far mainly on the basal part of Rio Bonito Formation, within fine sandstone lenses just above some coal horizons. The above is valid for the region of Figueiras. However, the Permo-Carboniferous sediments of the Paraná Basin extend both north and south of Figueiras, indeed reaching Uruguay. Although the lateral changes in the sedimentary facies are well known in certain regions, it seems to me that, in general, the sedimentary environment related to uranium concentration in these Gondwana sediments has not yet been studied in depth. In addition, there are granitic rocks and extrusive acid volcanics which could be a source rock for uranium, making all this Gondwana land a very interesting target for prospection.



**II. EXPLORATION TECHNIQUES APPLICABLE TO  
THE SOUTH AMERICAN ENVIRONMENTS**

**II. TECNICAS DE EXPLORACION APLICABLES  
A LOS AMBIENTES SUDAMERICANOS**



## GASES IN URANIUM EXPLORATION

R.J. WRIGHT, J.C. PACER

US Department of Energy,

Washington, DC,

United States of America

### Abstract-Resumen

#### GASES IN URANIUM EXPLORATION.

Interest continues to grow in the use of helium and radon detection as a uranium exploration tool because, in many instances, these radiogenic gases are the only indicators of deeply buried mineralization. The origin of these gases, their migration in the ground, the type of samples and measurement techniques are discussed. Case histories of comparative tests conducted on known uranium deposits at three geologically diverse sites in the United States of America are also presented.

#### LOS GASES EN LA EXPLORACION DE URANIO.

Cada vez es mayor el interés por el empleo de la detección del helio y del radón como instrumento para la exploración de uranio, pues en muchos casos estos gases radiogénicos son los únicos indicadores de una mineralización profunda. Se examina el origen de estos gases, su migración en el terreno, el tipo de muestras y las técnicas de medición. Se presentan casos concretos de ensayos comparados realizados en yacimientos conocidos de uranio en tres emplazamientos geológicamente distintos de los Estados Unidos.

### INTRODUCTION

Most of the world's uranium ore bodies have been discovered by measuring radioactivity; thus, radiometric surveys hold first place among today's uranium exploration techniques. However, such surveys have one major disadvantage: they collect information only from the upper 40 cm of the earth's surface and, therefore, may not provide a clue to ore bodies at depth.

For many years there has been interest in the use of gases for uranium exploration. This interest continues to broaden as near-surface ore bodies are found and the search for ore bodies at greater depths becomes more important.

In the United States of America several projects are underway by the US Department of Energy to determine the usefulness of helium and radon measurements in exploration; much of this work is carried out by Bendix Field Engineering Corporation and its contractors. The US Geological Survey has in the field a mobile mass spectrometer devoted to studies of helium distribution. Several private companies offer instruments and services that can be used in radon and

helium investigations. The experience and knowledge of these groups have been drawn on in attempting to summarize the present state of knowledge.

First, the physical basis for the generation of gases by uranium is discussed; then the types of surveys that may be undertaken are described; next the results of surveys in four test areas with uranium ore are presented; and finally, some ideas about the usefulness of gases in uranium exploration in Latin America are offered.

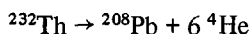
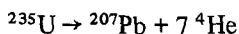
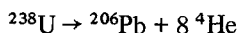
## ORIGIN OF RADON AND HELIUM

Figure 1 presents the familiar radioactive decay series of uranium-238, which ends with lead-206, a stable, non-radioactive element.

Radon-222 is the sixth daughter isotope of uranium-238; it is a chemically inert, radioactive gas with a half-life of 3.8 days. In the sub-surface it moves by diffusion through openings and voids and by transport in groundwater. Movement, however, is limited by the short half-life, and after five half-lives (about 20 days) most of the atoms of radon in a given sample have decayed to polonium-218.

Helium, a chemically inert, non-radioactive gas, forms differently. During the decay of uranium-238 each radioisotope produces either a beta or an alpha particle. The eight alpha emitters are indicated in Fig.1 by vertical arrows pointing downwards, while beta emitters are indicated by diagonal arrows pointing upward and to the right. An alpha particle combines with two free electrons to form helium-4, indicated by the shaded circles, so the decay of one uranium atom produces eight atoms of helium.

However, helium-4 is also produced by the decay of thorium (as well as uranium-235) as follows:



Since the earth's crust contains four or five times more thorium than uranium, much of the helium in the atmosphere is formed from thorium rather than uranium. Furthermore, some helium-4 may have been present at the time of the earth's formation and is unrelated to the decay of either uranium or thorium.

The atmosphere contains an average of 5.2 ppm helium, the sixth most abundant gas. Migration into the atmosphere of the helium derived by radioactive decay of uranium and thorium in the crust continues to add small amounts each year. Thus, it is estimated that 0.7 ltr of helium passes upward through each square kilometre of the earth's surface every year. Upon this average flux

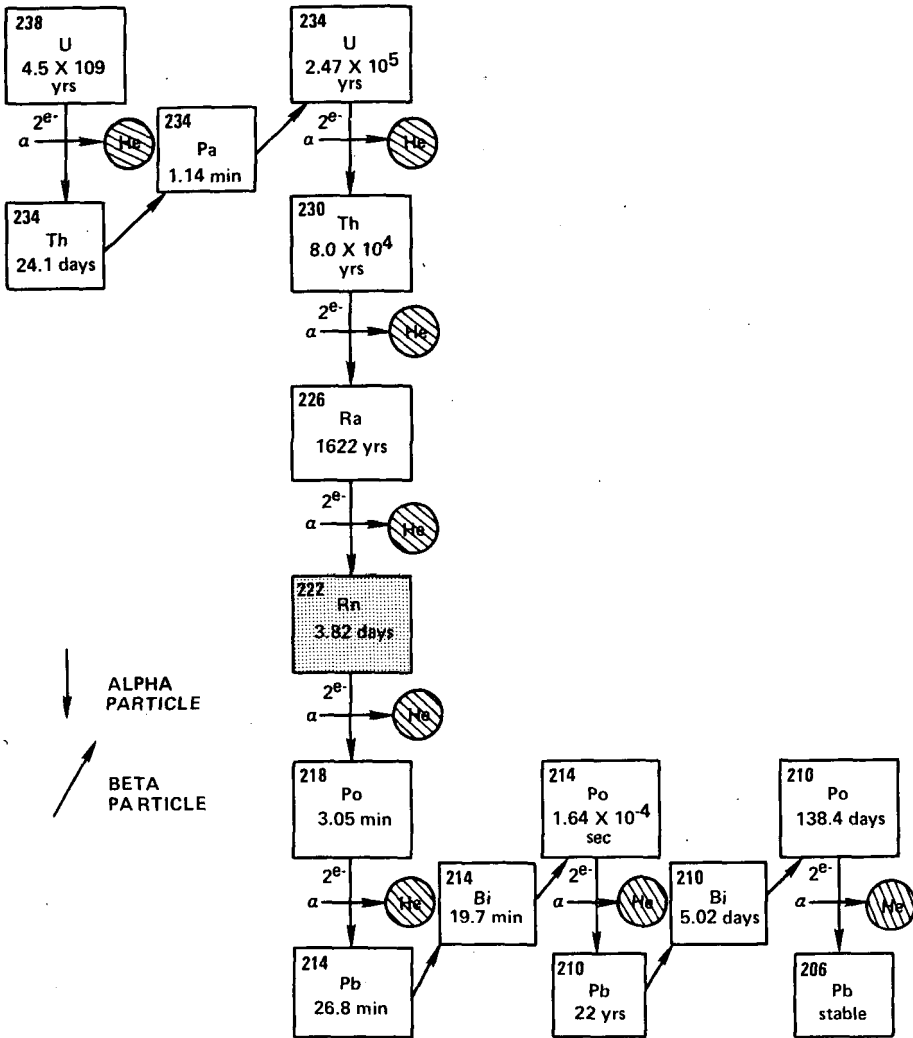


FIG.1. Radioactive decay of uranium-238.

( $0.7 \text{ ltr/km}^2$  per year) are superimposed areas of higher flux, caused by various earth features including enrichments of uranium or thorium. In addition, some natural gas fields contain unusual amounts of helium which may cause enhanced surface values. Geothermal areas are known for high helium values because the migration is increased by the elevated temperatures and complex structures.

Helium concentrations have been noted around areas of deep faults, and for this reason helium measurements are now being investigated in the study of earthquakes.

As might be expected, the movements of both radon and helium in the sub-surface are complicated by a number of factors. Obviously the permeability of the rocks has a great deal to do with the rate of movement. In a tight rock, such as shale, permeability is low and the rate of movement is low; conversely, high permeability, as in a sandstone, permits faster movement. If the pore spaces of a rock are saturated with water, the permeability is restricted. However, gas may be dissolved in groundwater and transported by groundwater movements. Finally, soil gas (the sample medium in some surveys) can be affected by changes in temperature, barometric pressure, wind velocity and humidity of the atmosphere.

## TYPES OF SAMPLES

Radon and helium can be measured in gases from several types of samples: soil gas, soil, groundwater, atmosphere, drill mud.

Some of the measurements reported here were made on soil gas, which refers to the gas in the interstices around soil particles at depths of 20 to 90 cm below the surface. The radon measurements were made in the field by placing detection cups about 70 cm below the surface. Helium determinations were made in the laboratory after collecting soil gas at depths of 30 to 90 cm. Helium in soil gas is commonly reported in parts per billion (ppb) above the normal atmospheric content of 5200 ppb. Fortunately, the atmosphere provides a uniform background against which anomalies can be measured, and experience shows that anomalies marked by values of only 50 to 100 ppb He above background may be significant.

Samples of soil can also be used for helium measurements. A 9-cm diameter hole is drilled with a power auger and the soil sample taken at a depth of 30 to 90 cm with a coring tool or an auger. Each sample is hermetically sealed at the site before transport to the laboratory for degassing and analysis. Helium values obtained by degassing soil samples are higher, by several orders of magnitude, than those for soil gas at the same site. This is probably due to the fact that the helium present in the soil is contained not only in the interstitial gas but also in the films of water around mineral grains.

Perhaps the most useful sample medium for both radon and helium is groundwater, which can be a regional favourability indicator. However, in many localities there is apt to be a practical limitation because of the unavailability of well water or spring water.

## TYPES OF MEASUREMENTS

The following list gives the common types of measurements and the types of instruments used in connection with them:

Measurement	Instrumentation
Radon	Alpha detection cups Electronic alpha detectors
Helium	Mass spectrometer
Helium — corrected to normal dry air	Mass spectrometer and gas chromatograph
Helium-4/helium-3	Mass spectrometer
Helium-4/argon-36	Mass spectrometer

Radon surveys can be undertaken with detection cups or electronic detectors, which provide time-integrated radon values, or with an emanometer, which provides instantaneous radon values. The cups are small plastic devices containing an alpha-sensitive film. The cups are placed in holes about 70 cm below the ground surface and remain in place for at least two weeks. Upon return to the laboratory the total alpha activity is determined.

An alternative approach is to place electronic alpha detectors in the soil. These are more sensitive than detection cups and can provide meaningful readings during the course of one to two days. The instruments provide a direct reading and no laboratory service is needed. The single cost item is the initial investment, about US \$500 or more per unit.

Finally, instantaneous radon determinations may be made with a zinc sulphide emanometer. A probe is placed about 25 cm below ground surface and the soil gas pumped into the detector chamber. The alpha activity is corrected for thoron present and radon daughter in growth.

All helium surveys depend on availability of a suitable mass spectrometer. Although mobile mass spectrometer units for field use are under development, most surveys rely on samples sent to a laboratory for analysis.

Of the four types of helium surveys described, the simplest is the uncorrected recording of total helium-4 content. In the other three, additional measurements are used to correct the helium content to some chosen standard. In one approach, the other gases normally present in soil gas (e.g. nitrogen, carbon dioxide, water vapour, methane and ethane) are measured by a gas chromatograph, and the helium value is adjusted with respect to the background values of each gas. In another approach, the helium-4 measurement is corrected with respect to helium-3, an isotope of helium that is non-radiogenic. Similarly, argon-36 can be used for standardizing the helium reading. All three methods of correcting the helium-4 values have the same objective in mind, that is, to remove any local

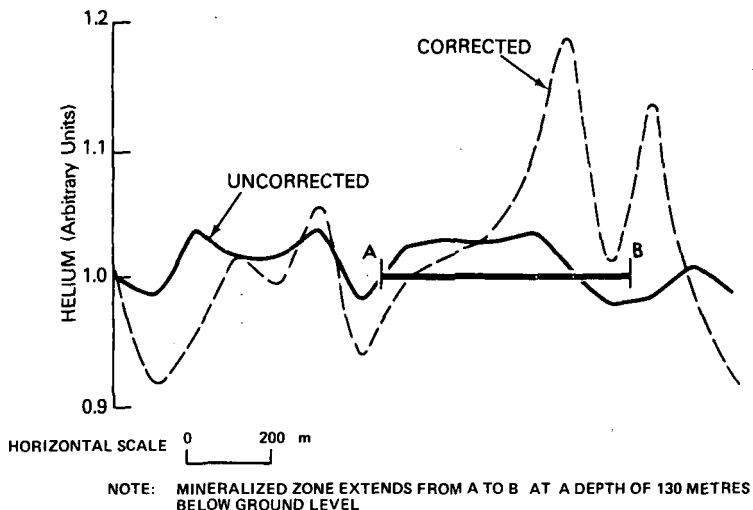


FIG.2. Helium profiles above mineralization at 130 m depth.

effects at the sample site (such as variations in organic content of the soil) that may tend to concentrate or deplete other gases and thus affect the relative helium value.

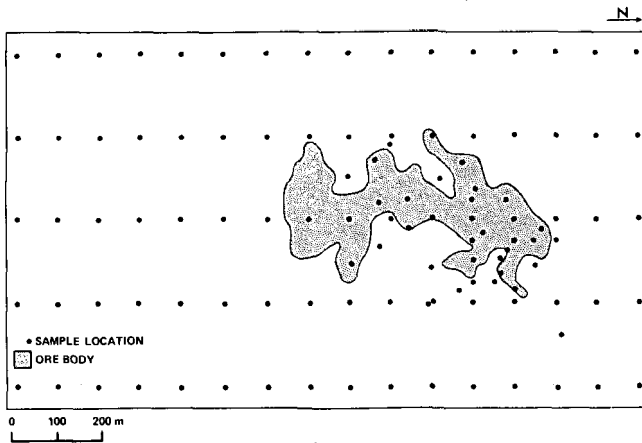
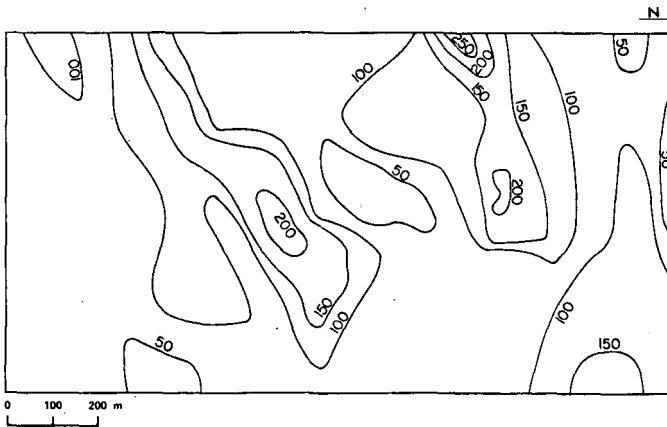
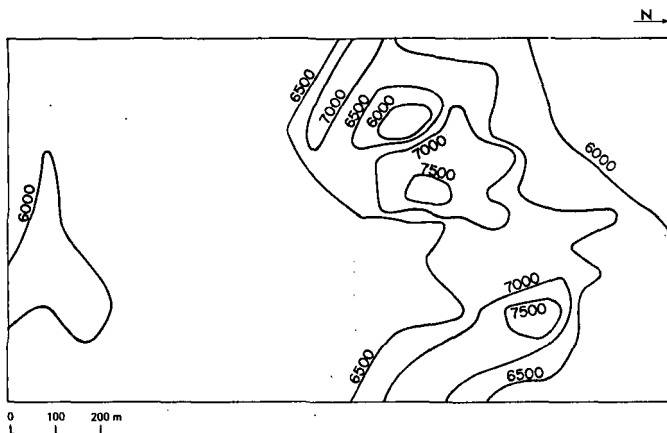
Figure 2 demonstrates the enhancement of a helium anomaly by normalizing the values so that the resulting helium value is the same as in normal dry air. The uncorrected helium readings, shown by the solid line, indicate a weak, but recognizable, anomaly. The dash line, representing the corrected values, presents a sharper anomaly, more directly centred on the mineralization.

It is hard to judge, with present knowledge, whether the added cost is justified by the practical importance and value of the various corrections. In practice most surveys are conducted without the additional measurements needed for corrections.

## FIELD TESTS

Figures 3 to 11 present the results of helium and radon surveys carried out by Bendix Field Engineering Corporation at three geologically diverse sites with known uranium ore deposits. A helium survey by Chemical Projects Ltd in the Grants district, New Mexico [1], is then discussed.

The Red Desert test site is located in central Wyoming (Fig.3 and Ref.[2]) in an area of flat-lying continental sandstone of Tertiary age. The known ore body

*FIG.3 Red Desert test site.**FIG.4. Red Desert test site – radon by Track Etch.**FIG.5. Red Desert test site – helium in soil.*

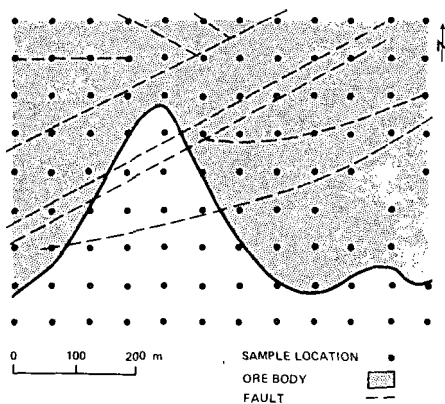


FIG.6. Copper Mountain test site.

is approximately 140 m deep. The radon data (Fig.4) were obtained by Track Etch cups which detect radon in soil gas. An anomalously high radon signal is apparent over the northern section of the ore body. This brings up a long standing question about radon: how far can it migrate under typical conditions, with a half-life of only 3.8 days? Theoretical modelling suggests a maximum distance of 10 m. Research at the Red Desert test site indicates that about half of the radon measured by Track Etch comes from radium at zero to one metre below the surface, and the rest is from radium at greater, but still relatively shallow, depths. This near-surface radon is produced from a geochemical halo of radium that is supported by migration up, from the ore, of various isotopic predecessors of radium. The corrected helium data for degassed soil samples are contoured in Fig.5. Against a local background of 6000 ppb He, an anomaly with values up to 7500 ppb, is apparent. At this site it appears that both helium and radon provide anomalies related to the known uranium deposit. The anomalous helium region is broader than that for radon, suggesting that helium may require a lower sample density than radon.

The Copper Mountain test site (Fig.6 and Ref. [2]) is also in the state of Wyoming. The ore-bearing Precambrian granite is at the surface in the eastern part of the sample area but is covered elsewhere by the Tertiary Teepee Trail Formation, which consists of conglomerate, sandstone, siltstone, and bentonitic clay and mudstone. The deposit is structurally controlled by fault zones in the granite. It ranges in depth from 5 m in the eastern section of the test site to 100 m in the western section. The contoured radon data (Fig.7) suggest an anomalously high radon signal over part of the ore body. The helium data (Fig.8) are also anomalous over part of the ore body. The irregular form of the helium and the radon anomalies is believed to be due to the irregular distribution of bentonite in the

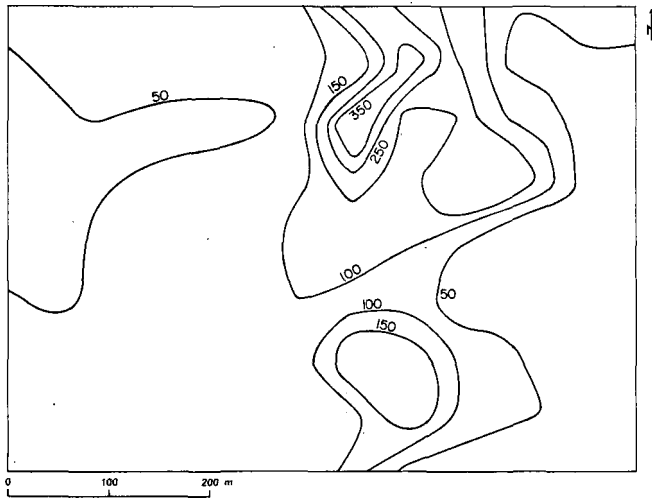


FIG.7. Copper Mountain test site – radon by Track Etch.

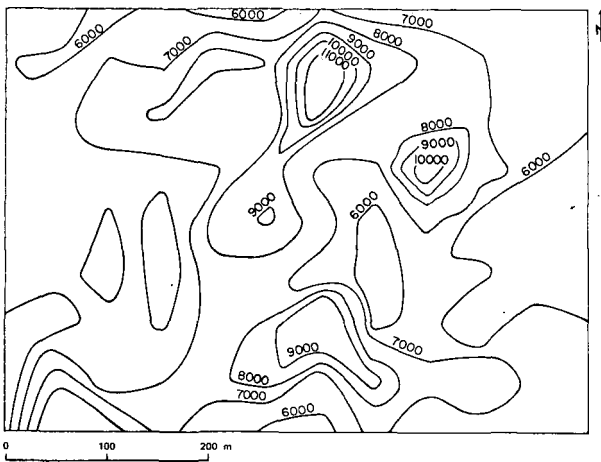


FIG.8. Copper Mountain test site – helium in soil.

Tertiary cover. Bentonite is relatively impermeable and reduces the upward mobility of the gases.

The sample locations at Spokane Mountain test site [2], in the state of Washington, and the ore body are shown in Fig.9. The deposit is at the contact between Cretaceous Loon Lake batholith (quartz monzonite) and the Precambrian Togo Formation (calcareous and pelitic metasediment), which forms a roof

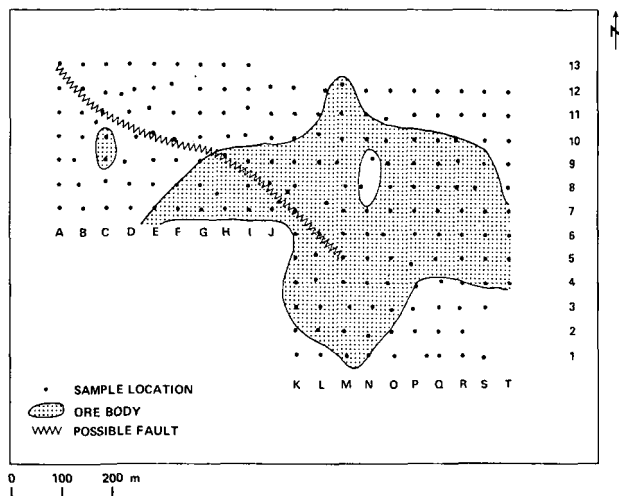


FIG.9. Spokane Mountain test site.

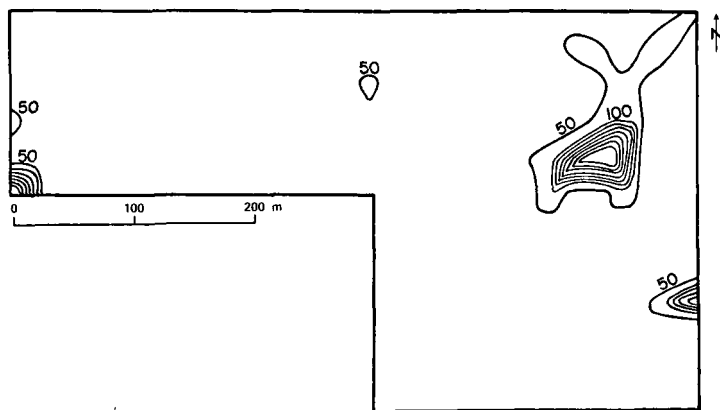


FIG.10. Spokane Mountain test site - radon by Track Etch.

pendant in the Loon Lake intrusive. The ore body ranges in depth from the near surface in the eastern section of the test site to 130 m in the western section. Figure 10 shows the contoured radon data whose values are lower than at the other two sites, and the concentrations are marginal to the ore. The anomalously high radon region in the eastern section is believed to be related to the Togo/Loon Lake contact, which is altered and highly permeable. Similarly, the high radon value in the western section of the site is related to alteration of the Togo at the

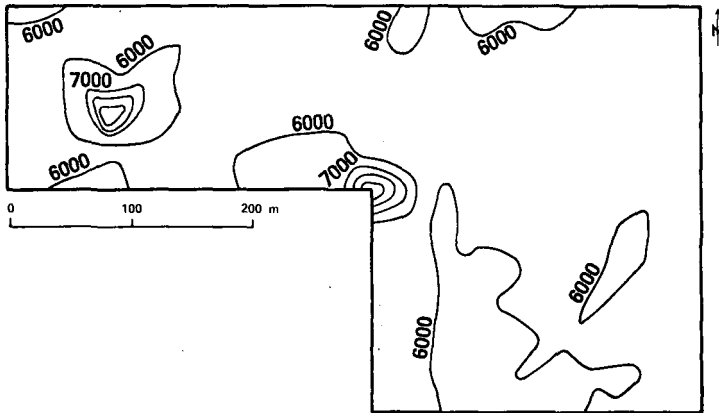


FIG.11. Spokane Mountain test site — helium in soil.

surface. The helium values (Fig.11) are lower than at the other two research sites and appear to follow the inferred fault. Thus both helium and radon may be structurally controlled.

The Grants mineral belt of New Mexico, the most important uranium district of the United States of America, provides a final case history and illustrates the use of helium measurement in soil gas. Here the geology is uncomplicated. The rocks are flat lying with alternating sandstone and shale units (Fig.12). The ore bodies are found to occur at three levels in the Upper Jurassic Westwater Canyon Member of the Morrison Formation at depths of 150 to 225 m below the surface but above the present water table. The ore zone in the central portion of Section 13 is outlined by a heavy line. The soil gas samples were taken at a depth of 20–30 cm. It is clear that the highest values, 120 ppb helium above a background of 5200 ppb, are directly over the ore body (Fig.13). Although the values do not outline the ore body, they certainly centre upon it.

## APPLICATIONS TO LATIN AMERICA

What can these four examples tell us about the possible use of radon and helium for uranium exploration in Latin America? The most important conclusion is that a uranium ore body at depth can be indicated by radon and helium measurements at the surface; therefore, gas surveys can provide a useful exploration tool. This does not mean, of course, that an anomaly provides a sure target for drilling, because (1) an anomaly can be caused by various earth features other

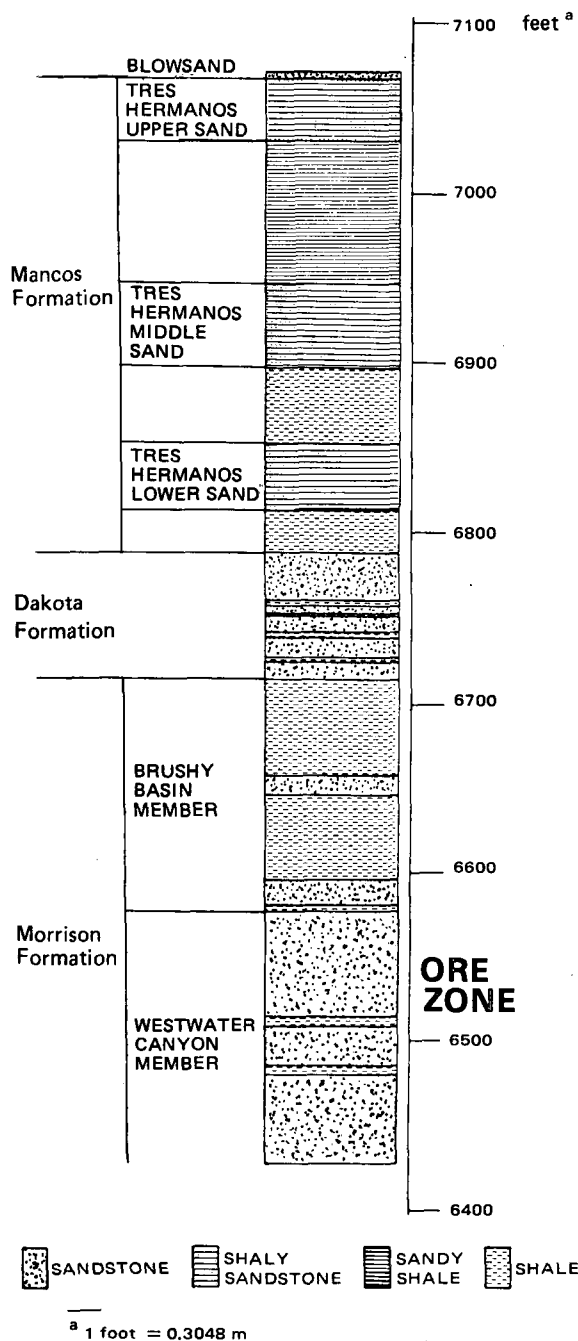


FIG.12. Stratigraphic section, McKinley County, New Mexico.

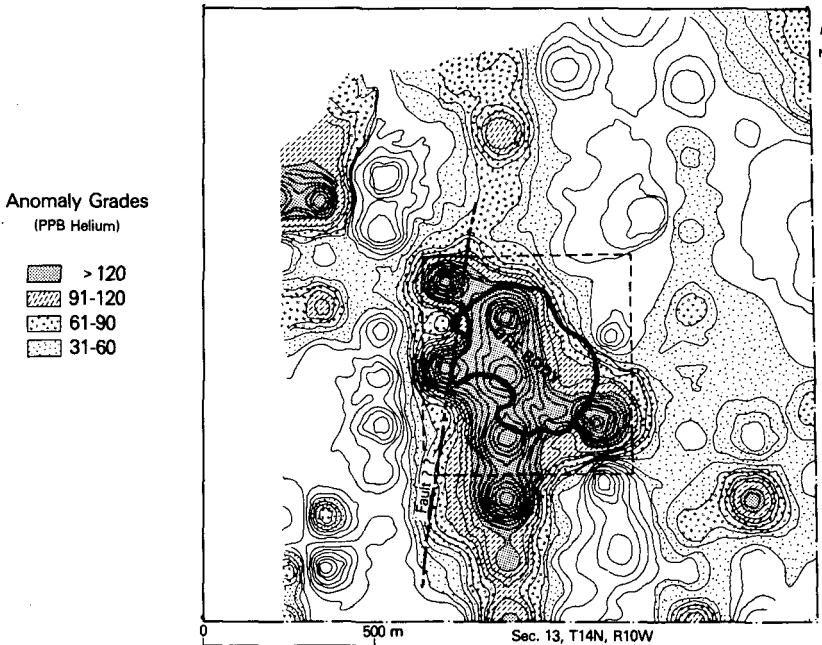


FIG. 13. Helium survey, McKinley County, New Mexico.

than ore; (2) an anomaly is not apt to match the form of an ore body; and (3) an anomaly may be to one side of the ore rather than directly above it.

Of the four examples presented in the previous section, the simplest anomalies are in localities with the simplest geology, as, for example, at the Red Desert, Wyoming and the Grants, New Mexico sites. In contrast, the Spokane Mountain area presents a more complicated picture, because the faults, contacts and other variations in local geology affect the upward migration of gases and cause irregular anomalies. The more complicated the geology the more difficult is the interpretation of a gas survey.

In beginning exploration in a new area, attention should first be given to its principal geological features, particularly those which can affect the movement of fluids. Preliminary traverses should be made before engaging in a full-scale survey. A good approach is to take a series of readings or samples along traverse lines oriented to cross the main geological elements. This will help determine the background values of radon or helium in the various rock units and the influence of faults and other breaks. The appropriate depth for sample collection can also be determined. Ideally, deeper samples are better, being less affected by atmospheric changes, but this must be balanced against the cost of drilling deeper holes. If possible, samples or readings should be taken at a minimum depth of 30 cm unless

the soil is saturated with water. Groundwater samples are particularly useful and should be used first in a new area. Either well water or spring water is usable, but spring water must be collected at the source because downstream the water tends to lose gases upon exposure to the atmosphere. Finally, the test site will permit a selection of the techniques, equipment and services to be used.

Although gases offer no panacea to the problems of uranium exploration, the increased knowledge about the usefulness of this tool will bring it forward among the standard types of technology to be used for finding uranium.

## REFERENCES

- [1] CHEMICAL PROJECTS LTD., "Helium survey in section 13, T14N, R10W, McKinley County, New Mexico", Suppl. Rep., The Potential of Helium as a Guide to Uranium Ore, Electric Power Research Inst., Palo Alto., Rep. EPRI-EA-813 (1978) 34.
- [2] PACER, J.D., CZARNECKI, R.F., HOLDEN, J.F., "An evaluation of helium and radon for uranium prospecting", 48th Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists, San Francisco, 1978.

## DISCUSSION

C. PREMOLI: Thank you for your most informative paper, Mr. Wright. I have two questions. Can you give us an idea of the costs involved in helium measurement? Apparently in all the helium surveys you conducted in the USA you used a square grid; wouldn't a triangular one be more effective?

R.J. WRIGHT: During the preparation of this paper I tried to determine representative costs and found that these vary widely. Much depends on site-specific field costs and whether more than one field visit is necessary, for example, to place alpha detection cups and to retrieve them later. Some representative units costs in the USA are: alpha detection cups, \$11.00 to \$16.00 each (depending on quantity), including processing of results; helium analysis, \$20.00 to \$35.00 each (depending on quantity and type of sample); electronic alpha detectors for use in soil, \$550 to \$1100 each; radon 'sniffers' for instantaneous measurements, \$4000 to \$6000 each. In response to the second question I would say that it's largely a matter of preference. For me, the square grid has one advantage — the density can be increased or decreased while maintaining the same relative distance between the sample points.

M. TAUCHID: You have mentioned the two methods of Rn measurements. You showed us the alpha track measurements. Do you have any information as regards the other method of measurement (using an emanometer) over these test areas?

R.J. WRIGHT: I have no such information with me here. In general, tests of other methods show that they give about the same relative values for Rn as the alpha track detection cups system.

P.M. BARRETTO: I am very pleased to see that the gaseous geochemistry R and D programme is bringing some light to this powerful exploration technique. I would like to know (1) if there could exist surface contamination due to drilling; (2) if the so-called 'pumping effect' due to atmospheric pressure variations was observed and if it was important; (3) according to your experience, which method (He or Rn) would be preferable or should both be carried out simultaneously.

R.J. WRIGHT:

(1) By repetitive sampling at various depths we have determined that surface contamination has no effect at depths greater than 30 cm.

(2) We have developed some information on the 'pumping effect' by modelling studies and by continuous monitoring of Rn values below surface. I do not have this information here but I will be pleased to send it to you. The conclusion is that the effect is negligible, for practical purposes, at depths below 30 cm.

(3) I asked this question of several experts before coming here to Lima. The answer was: if possible, do both He and Rn. I have no idea which one will eventually prove to be the more useful. One impressive thing is the improvement in He survey procedures: sample collection, sample integrity en route to the laboratory and laboratory analysis. Years ago He surveys were largely discredited, but many of the erratic results may have been due, in fact, to faulty procedures.

P.A. SAMSON: It is important to note that the Track Etch method enables the daily fluctuations to be integrated and does not need large numbers of operating personnel. The emanometric technique is affected by the daily variations and requires large teams of people if the maximum number of measurements are to be obtained under identical atmospheric conditions.

R.J. WRIGHT: Thank you for your observations, which are valid and with which I agree. However, one should not lose sight of the necessity, with Track Etch, to visit each sample site twice, to place and to retrieve the cups. In difficult terrain this might require considerable cost.



# HIGH SENSITIVITY AIRBORNE RADIOMETRIC SURVEYING OVER TROPICAL AND RAIN FOREST AREAS

K.A. RICHARDSON

Department of Energy, Mines  
and Resources,  
Ottawa,  
Canada

## Abstract-Resumen

### HIGH SENSITIVITY AIRBORNE RADIOMETRIC SURVEYING OVER TROPICAL AND RAIN FOREST AREAS.

Two decades of research, development and application of high sensitivity airborne gamma-ray spectrometric surveying methods by the Geological Survey of Canada has led to the recognition and understanding of many factors which affect the compilation and interpretation of survey results in the Canadian environment. Some of these, as well as additional factors related particularly to climate, weathering and vegetation in tropical regions, are briefly discussed. Notwithstanding the complications arising from gamma-ray attenuation by soil moisture and vegetation biomass, distortion of aircraft altimeter measurements by dense forest canopy, and redistribution of radioelements by weathering and vegetation, results of surveys from the Ivory Coast and Brazil indicate that airborne gamma-ray surveying can be beneficially applied to uranium exploration in tropical regions.

### INVESTIGACION RADIOMETRICA AEREA DE ALTA SENSIBILIDAD EN ZONAS TROPICALES Y DE SELVA HUMEDA.

Dos decenios de investigación, desarrollo y aplicación de métodos de investigación aérea por espectrometría gamma de alta sensibilidad, a cargo del Geological Survey del Canadá, han permitido percibir y conocer muchos factores que afectan al acopio e interpretación de los resultados de las investigaciones. Se examinan brevemente algunos de estos factores y otros relacionados particularmente con el clima, la meteorización y la vegetación de regiones tropicales. A pesar de las complicaciones resultantes de la atenuación gamma por la humedad del suelo y la biomasa vegetal, de la distorsión de las mediciones del altímetro del avión por la espesa bóveda que forma la selva y de la redistribución de los radioelementos por la meteorización y la vegetación, los resultados de las investigaciones efectuadas en Costa de Marfil y Brasil indican que la espectrometría gamma aérea puede utilizarse ventajosamente para la exploración de uranio en regiones tropicales.

## INTRODUCTION

The application of airborne gamma-ray spectrometry to uranium exploration in parts of South America may be complicated by a number of factors. Some of these factors are inherent in application of the method to any region; in tropical areas additional factors must be taken into consideration.

Experience in Canada, particularly over the Precambrian Shield, has shown that reconnaissance airborne gamma-ray spectrometry is a successful method for mapping radioelement distribution patterns, and thus for outlining uraniferous metallogenic and geochemical provinces. These regions of uranium enrichment are considered to be the most favourable locations for uranium deposits [1]. However, the different climate, vegetation, weathering and soil cover in tropical regions present different problems in the application and interpretation of airborne gamma-ray spectrometric surveying.

To determine which factors may affect radiometric surveying in a particular area, one might consider the many and varied regions of South America. Harrington [2] divided the Continent into 42 morphostructural regions. These 42 regions can be grouped into 5 types — shields, basins, savannahs, cordilleras and punas — each type presenting its inherent difficulties to airborne surveying, and depending on differences in climate, weathering or vegetation, separate areas of the same type might present different problems. Problems related to individual areas are not discussed in detail because the specific characteristics of the areas are not known to the author, but the general factors which affect survey results are discussed, and these should be considered in conjunction with the regional characteristics when an exploration programme is being planned.

In the context of the economic constraints which afflict all developing countries, the question often arises as to whether a low technology approach may not be more suitable than the high technology approach which it is assumed would be used by an industrialized country. Unfortunately, it is not a simple question with a simple answer. Low technology is usually taken to mean the application of correct but elementary skills and simple techniques by large numbers of people. A high technology approach is usually assumed to mean the use of expensive equipment by small numbers of highly trained people. An exploration programme that provides misleading data should be avoided at all costs, and for this reason a suitable technology with proven performance should be employed. Mineral exploration is an activity with a low probability of success even under favourable circumstances, and therefore it is not so much a case of choosing a low technology approach or a high technology approach, but rather a matter of choosing the correct technology approach for the circumstances. Once the correct technology for a region has been established on the basis of experience in similar regions elsewhere, or

on the basis of trial and orientation surveys within the region, then the method should be applied as systematically as possible.

The first task in the recognition and assessment of uranium provinces is to prepare a map of the uranium distribution over the region of interest. Before any steps can be taken to prepare a map of the uranium distribution over a territory, certain preliminary types of information must be available. The most important of these are the availability of reliable topographic maps at a suitable scale, and the availability of recent aerial photographs at a scale of 1:30 000. Work should not be attempted in any area until such information is available. A further step that should be taken at an early stage, and completed before plans are finalized, is to prepare a compilation of all existing information pertaining to the geology of the region in question.

Many factors enter into the choice of method or methods to be used for uranium reconnaissance surveys. The most important of these are size of region, topographic relief, accessibility, climate and vegetation, the extent to which the geology is known, and the extent to which there are known mineral occurrences.

The cheapest type of reconnaissance survey is of course performed by one man on foot with one scintillation counter. Depending upon the conditions his rate of progress may vary between 5 and 0.5 km/h, and he will be searching a strip about 5 m wide under favourable conditions. A capital investment of about \$1000 would be required to equip such a search. To achieve a reasonable rate of progress over any substantial area it would be necessary to equip hundreds of operators with scintillation counters. Quite apart from the obvious management problem, the capital cost for scintillation counters would run into hundreds of thousands of dollars.

Car-borne surveys with a scintillation counter are usually regarded as the most economical type of reconnaissance survey. The rate of traverse can be of the order of 40 km/h, and the width of strip that is searched may be increased to 10 m by having the scintillation detector above the roof of the vehicle. However, vehicle-mounted surveys are restricted by the availability of roads and passable tracks, and they can only be used off the road in open savannah or prairie country. Roads and tracks usually take the flattest possible route or the easiest route over a range of hills, and avoid as far as possible geologically significant exposures. Nevertheless, useful results have been and can be obtained with car-borne surveys, and they are the first method which should be considered for any region where there are a reasonable number of roads or tracks. The minimum capital cost for car-borne equipment would be of the order of \$8000.

The fastest way of carrying out a uranium reconnaissance is to employ an airborne radiometric survey with a high sensitivity gamma-ray spectrometer system. Such a survey is most suitable for an area of low relief, with either a large amount of bedrock exposure or residual soils which have not undergone

extensive leaching. In an area of tropical rain forest, where soils have been thoroughly leached, much less can be expected of such a survey. In areas of moderate to severe topographic relief, airborne surveys with fixed-wing aircraft are ineffective and also very hazardous. In such circumstances an airborne survey can only be performed with a suitable helicopter. This greatly increases the costs. Mountainous areas with high rates of erosion are more suitable for stream sediment geochemical surveys, provided it is possible to obtain access to a sufficient number of sampling sites. If access on the ground is difficult, it may be necessary to use helicopters to airlift the sampling crews, but this may be difficult and dangerous in heavily forested regions.

Satisfactory reconnaissance surveys have been performed in different parts of the world, using 5 km spacing for airborne surveys and 1 sample per 20 km<sup>2</sup> for ground geochemical surveys. However, it should be pointed out that if available information for a region suggests that there is reason to doubt whether a given type of survey will be successful, then a preliminary assessment should be made with the methods in question over a limited portion of the region. Whatever method is being used the best indicator for continuing with the method is the presence of statistically significant signals in the data over and above the noise level. If no statistically significant signals are apparent, then there is no point in continuing.

## REVIEW OF THE AIRBORNE GAMMA-RAY SPECTROMETRY PROGRAMME IN CANADA

Experimentation in the 1960s by the Geological Survey of Canada (GSC) led to the design and construction of a high sensitivity airborne gamma-ray spectrometer system in 1968 with NaI detectors of total volume 50 000 ml. This spectrometer is normally flown at 125 m terrain clearance and 190 km/h in a fixed-wing aircraft. Darnley [3] presented specifications for a high sensitivity spectrometer system and survey parameters. The objective of the GSC programme was to develop a spectrometer system with adequate sensitivity that could be flown at a reasonably safe altitude over large areas relatively quickly and could provide reasonable statistics to produce maps of the radioelement concentrations and their ratios. The resulting maps and profiles could then be used as an aid to geologic mapping and mineral exploration.

Data collected from 1969 to 1975 show responses both to known uranium deposits (Elliot, Bancroft, Uranium City) and to areas of high potential (e.g. Mont Laurier, Fort Smith). These data demonstrate the merit of the method as an aid to geologic mapping, and show that uranium deposits and occurrences tend to be associated with regional enrichment of uranium [4]. In addition, the data were analysed to develop an understanding of the calibration factors, correction factors and data enhancement and presentation techniques.

This experience led to the specifications for Canada's Uranium Reconnaissance Program (URP), which ran from 1975 to 1979. The programme was designed primarily to cover areas of the Precambrian Shield with low topographic relief, having some significant percentage of outcrop.

Experimentation with the contouring of data and varying flight line spacing [5] showed that reconnaissance surveys with 5 km flight line spacing were adequate to delineate any significant regional enrichment in uranium. Subsequent ground investigation of anomalies obtained in the airborne surveys in various parts of Canada showed the relationship between radioelement concentrations measured by the airborne gamma-ray spectrometer and radioelement concentrations in the outcrop and overburden on the ground [6]. Relations between features on gamma-ray spectrometric maps and published geology or aeromagnetic maps show that, although gamma-ray spectrometry only samples the top few tens of centimetres of the surface, these measurements reflect the underlying geology.

Two of the most important aspects of the URP have been the specification for proper calibration of all airborne spectrometer systems involved in the survey work and the presentation of results in units of radioelement concentration (% K, ppm eU, ppm eTh). This permitted assembly of data collected over several years with different spectrometers into one contour map of radioelement distributions in Canada.

Figure 1 is an equivalent uranium contour map showing the coverage of Canada up to and including 1977. It has been necessary to simplify the results considerably to produce a map at this small scale. Some regional trends of uranium concentration are evident. The map also shows a trend towards slightly increasing eU levels in the north, where there is coincidentally less vegetation and overburden cover.

## POSSIBLE PROBLEM AREAS FOR AIRBORNE GAMMA-RAY SPECTROMETRIC SURVEYING IN SOUTH AMERICA

One of the basic considerations in planning an airborne geophysical survey is the accessibility of the area. Locations of airstrips, if remote from the survey area, will restrict the type of aircraft to be used, or may preclude an airborne survey. Another basic requirement is the availability of an adequate base on which to plan, execute and compile the survey results. This requirement will be filled to differing levels of adequacy by topographic maps, photo mosaics, or remote sensing imagery in different parts of the South American Continent. No further discussion of this possible limiting factor will be included here.

Other factors which may impose technical limitations to the implementation of a successful survey are the following: (1) topography; (2) background measurements; (3) altimeter measurements; (4) calibration; (5) navigation;

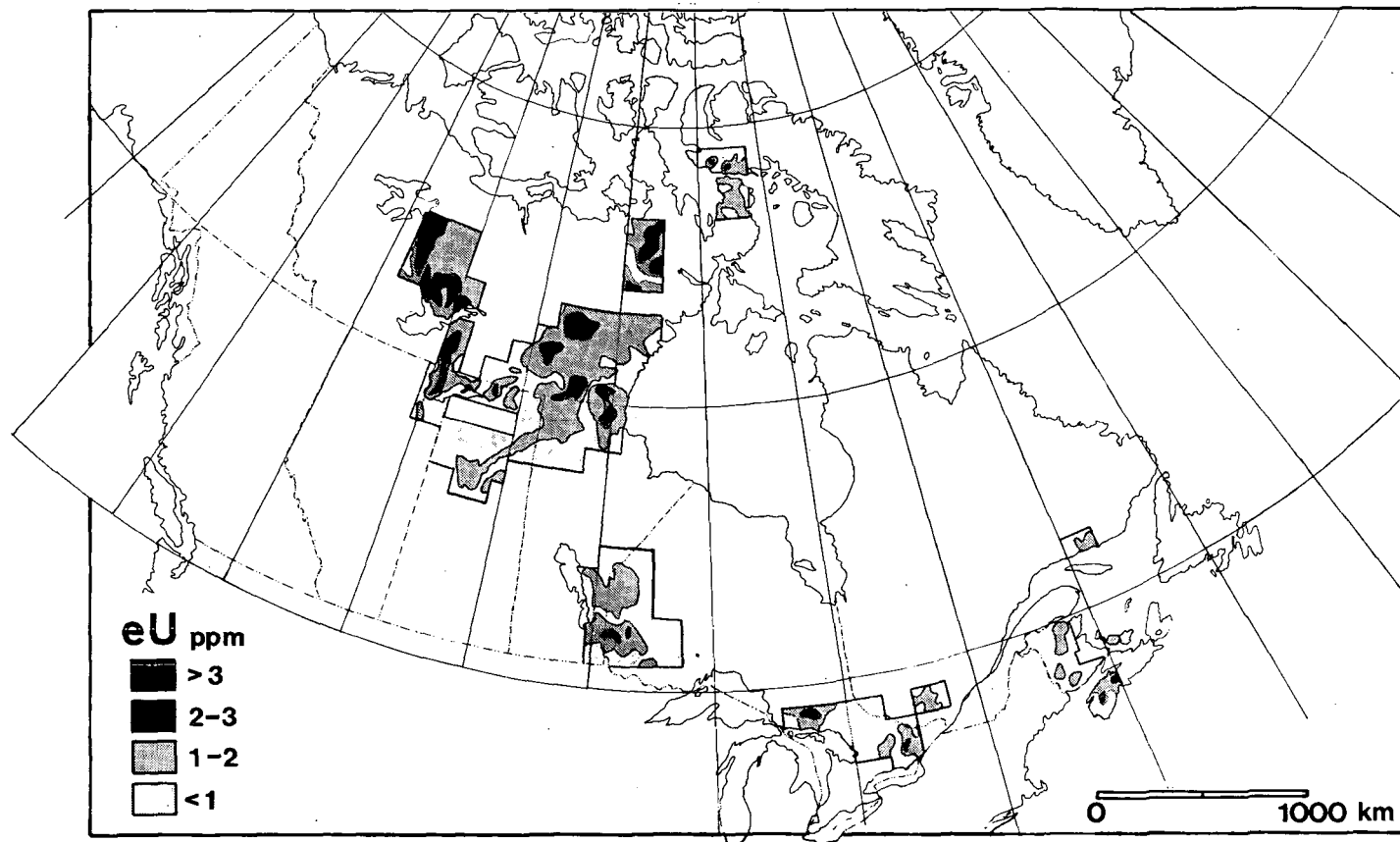


FIG.1. Results of reconnaissance airborne gamma-ray spectrometric surveys in Canada presented as contoured values of equivalent uranium concentration.

(6) vegetation; (7) rainfall, soil moisture; (8) weathering. The ramifications of these possible limitations are discussed in the following sub-sections.

## Topography

In planning an airborne reconnaissance or exploration programme the topography of the area to be surveyed must be considered. Areas of extreme relief prevent surveying at constant terrain clearance (contour flying) with fixed-wing aircraft, and dictate either the use of a helicopter for an airborne survey or the use of methods other than airborne radiometrics, such as geochemistry or ground radiometrics.

Complications arise when terrain clearance is excessive, and when the geometric relationship between the detector and source departs from the  $2\pi$  geometry for which an airborne system is normally calibrated.

### *Excessive terrain clearance*

Airborne gamma-ray measurements are corrected for deviations from the planned terrain clearance by first subtracting background count rates and then applying an atmospheric attenuation factor [7]. When terrain clearance is excessive residual errors due to small errors in the measured background and in the atmospheric attenuation coefficient may be magnified to create spurious anomalies or erroneously low values. The normal procedure in the Canadian URP for example, where surveys are flown at a planned terrain clearance of 125 m, is to delete the results whenever the actual terrain clearance exceeds 250 m. Consequently, an airborne survey in rugged terrain is likely to have gaps in the compiled results.

### *Geometric problems*

An airborne spectrometer detector normally receives ground radiation from horizon to horizon, i.e. from  $180^\circ$  solid angle. The calibration constants are determined only for this geometry. Under conditions of rugged topography, e.g. flying within a valley, the radiation can originate from an angle greater than  $180^\circ$  and produce a higher count rate than a measurement at the same altitude over relatively flat ground of the same composition. The effect of source geometry on airborne radiation measurements has been discussed by Grasty [7]. Spurious anomalies over valleys, depression of count rates over ridges if survey terrain clearance is maintained, and general distortion of airborne measurements can result from variations in the source-detector geometry over rugged terrain.

Large changes in elevation within a survey area can also produce errors in the measured background count rates.

### Background measurements

Measurement of background radioactivity is essential for the correction of airborne gamma-ray spectrometer measurements. The background comprises three components: (i) radon daughters in the atmosphere, (ii) cosmic radiation, and (iii) radioactivity of survey aircraft and instrumentation. The contribution from radon daughters in the atmosphere shows diurnal and seasonal variation [8] and may also vary with location within a large survey area. The cosmic component of the background varies with altitude. The aircraft/instrument radioactivity should remain a constant contribution to the background; however, changes in the quantity of fuel in the aircraft tanks can change the amount of shielding of the detectors from atmospheric and cosmic radiation.

Three methods of measuring background that have been used in airborne gamma-ray surveys are: (i) measurement at survey altitude over bodies of water large enough to prevent detection of radiation from the shoreline and beyond, (ii) measurement at an altitude high enough to prevent detection of radiation from the ground, and (iii) measurement with an upward-looking detector shielded from the ground, during survey data acquisition operations.

Background measurements at the planned survey terrain clearance over lakes or other bodies of water give a direct measure of the total background from all sources, under the survey conditions. Errors can arise if the lake is in a depression holding a cloud of concentrated radon daughters, if the elevation of the lake is significantly different from ground level elevation in the survey area, or if the lake is distant from the survey area. Elevation changes of 300 to 400 m can introduce cosmic background errors on the order of 10%, which are sufficient to result in obvious level errors between flight lines on the final contour maps. This same problem of cosmic variation with altitude, combined with possible differences in radioactive content of the atmosphere, introduces errors when background measurements are made at high altitude (>600 m terrain clearance) above the survey area. The 3.0 to 6.0 MeV energy region of the gamma-ray spectrum can be monitored to apply a correction for variation of the cosmic component, or recording of a barometric altimeter output during the survey might be used to obtain a correction factor.

Use of a shielded, upward-looking detector is a common method of measuring background where lakes are absent. However, detection of backscattered radiation from the ground and incompletely shielded radiation from the ground, in addition to possible inhomogeneity between the atmosphere above and below the survey aircraft (e.g. due to atmospheric temperature inversion), can contribute errors to these background measurements.

## Altimeter measurements

Two types of errors in altimeter measurements can affect airborne survey results in tropical and rain forest areas. The first of these, related to the above geometric problem, can arise in rugged topography. The beam angle or 'field of view' of a typical radar altimeter is approximately  $20^\circ$ ; the altimeter indicates the distance from the aircraft to the ground surface within that 'field of view'. The spectrometer 'field of view', however, is  $180^\circ$  and the distance from detector to ground surface within that 'field of view' can differ from the altimeter-measured distance if the aircraft flies over ridges or within valleys. Corrections for such errors might be made if an array of altimeters were used to measure terrain clearance laterally as well as vertically beneath the aircraft.

The second type of altimeter error that can occur in surveying areas of tropical forest results from failure of the altimeter signal to penetrate the forest foliage, thus giving a measure of detector distance from the tree canopy rather than from the ground. Altimeter tests carried out in the tropics by Nielsen [9] demonstrated that the radar beam did not completely penetrate vegetation and gave a negative systematic error in the measurement of aircraft-to-ground measurements. With a commercial version of radar altimeter this error decreased from about 6% of the flying height at 250 m to 1% above 600 m. Increasing the radar wavelength improves the penetration of the tropical forest canopy.

## Calibration

The importance of calibration of gamma-ray spectrometers of all types has been pointed out in various publications (Refs [1, 10, 11]). Measurements taken with calibrated spectrometers can be presented in meaningful units of radioelement concentration, results from different instruments can be compared and compiled together, and instrument malfunctions can be more readily recognized.

Airborne surveys have been conducted under the Canadian URP in survey areas located across the country, using just one airborne spectrometer calibration facility. Survey areas have been located at distances up to 3000 km from the facility. Airborne spectrometer systems were calibrated at the beginning and end of each survey season. Technically it should be adequate to conduct airborne spectrometer surveys throughout South America with one or two sets of geographically well located calibration facilities. However, it may be desirable to locate calibration facilities in different countries to alleviate the import/export complications of moving equipment from one country to another.

## Navigation

Airborne gamma-ray spectrometry surveys require the ability to make accurate flight path recovery. The required accuracy depends on the flight line spacing. In a reconnaissance survey with 5 km flight line spacing for example, location errors up to 0.5 km could be tolerated, whereas a detailed survey, covering a small area, requires considerably more accurate position locating, on the order of a few tens of metres.

The options for position location are visual navigation or some form of automatic navigation. In either case, a good topographic base map or photo mosaic base is required.

Visual navigation will be difficult or impossible in areas where identifiable land marks are absent, such as over tropical forest. Doppler methods alone lack the required accuracy, particularly for detailed surveys. A method, using a standard inertial navigation system, has been described by Gower and co-workers [12] and Grasty and co-workers [13], which gives an accuracy of  $\pm 10$  m provided adequate control points can be observed every 15 minutes. For small survey areas a microwave ranging system, with line-of-sight transponders set out on the ground, gives accurate positioning ( $\pm 10$  m) over the range of 50–100 km. Satellite navigation systems present future possibilities for accurate, automatic track recovery.

## Vegetation

The effects of vegetation on airborne gamma-ray surveying have been discussed in detail by Kogan and co-workers [14]. In addition to the above-mentioned effect of dense forest stands on altimeter measurements and concomitant errors in height corrections, forest biomass absorption of radiation, alteration of the 'field of view' and radioelement content of the vegetation affect the airborne gamma-ray measurements.

Depending on tree species, age and growing conditions, the quantity (surface density) of organic material in forest stands measured in the USSR is on the order of 5–10 g/cm<sup>2</sup>. Calculations by Kogan and co-workers [14] indicate decrease in dose rate above forests by a factor of 1.3 to 1.5, and even up to a factor of 2.5 to 3.0 over old (120 to 160 years) oak, fir and pine stands. In calculating the above results it was assumed that vegetation formed a homogeneous absorbing layer. However, the trunks of the trees do not form a homogeneous absorbing layer and result in anisotropic effect on the measured gamma-radiation. In effect, the anisotropy causes the shielding to be greater towards the periphery of the 'field of view' than it is directly beneath the detector. This has a collimating effect on the airborne measurements which restricts the 'field of view' of the spectrometer.

While the biomass has a shielding effect on the radioactivity emitted by the ground, the radioactivity of the vegetation itself contributes to the measured airborne gamma radiation. Kogan and co-workers [14] indicate that the concentration of uranium and thorium per gram of wood (and similarly potassium) in forest stands in the USSR is roughly one order of magnitude less than in the soil on which these stands grow, although increased concentrations of the radioactive elements in forests were observed in some cases in areas containing ores. Investigation of the radioactivity of various foods by Mayneord [15] showed a high concentration of alpha emitters (14 picocuries per gram) in the fruit of the *Bertholletia excelsa* tree which grows in the rain forests in valleys of the Amazon River. This concentration of radioactivity is two to three orders of magnitude greater than the concentrations of radium and thorium found in most Brazilian fruits and vegetables investigated by Eisenbud and co-workers [16]. It is suggested that vegetation growing in this tropical environment may contain concentrations of radionuclides, which will contribute significantly to the airborne gamma-ray spectrometric measurement.

### Rainfall, soil moisture

An early demonstration of the effect of rainfall on airborne gamma-radiation measurements was given by MacFadyen and Guedes [17]. An airborne radio-metric profile flown in Brazil after a prolonged dry period was reflighted after moderate rainfall. The count rate over an anomaly was reduced to 50% of its original amplitude one day after the rain, returning to 75% of its original amplitude on the second day and about 90% on the third day as the soil dried out.

Recently, monitoring of the soil moisture content and gamma radiation intensity at test areas in Canada over a period of several months showed that increases in the soil moisture from 13 to 37% was accompanied by a 15% decrease in total count (0.4–2.82 MeV) and a 50% decrease in the count rate in the  $^{214}\text{Bi}$  window (1.66–1.86 MeV).

In the USSR, measurements of soil moisture content over a two-year period [14] showed a seasonal variation from 7 to 25% in fields and 12.5 to 37.5% in forests. Variations of the gamma-field intensity as a result of seasonal variations in soil moisture content were as much as 15%.

A further effect of rainfall on measurements of gamma radiation is the washout of radon daughters from the atmosphere. Foote [18] shows that the intensity of effective surface bismuth-214 radioactivity increases by a factor of 3 to 4 after rainfall. This washed out radioactivity decays with a half-life of about 30 minutes. Charbonneau and Darnley [19] similarly found an apparent increase in equivalent uranium concentration by a factor of 10 after an intense thunderstorm in Canada.

### Weathering

In the Canadian environment, particularly in the Precambrian Shield, the surface is 25 to 30% covered by lakes; the land surface in much of the area that has been surveyed by airborne gamma-ray spectrometry is largely covered by glacial tills, with a small percentage of exposed bedrock. Evidence is presented by Perttunen [20] and Podolak and Shilts [21] for areas in Finland and Canada that material composing tills is of local origin, and consequently the till reflects the composition of the underlying bedrock. As a result, patterns of radioelement distribution determined by airborne gamma-ray spectrometry reflect the radioelement distribution in the bedrock. Charbonneau and co-workers [6] have shown the relationship between airborne measurements and analyses of overburden and outcrop for thorium, uranium and potassium on the ground.

In contrast with the Canadian case, masking of the radioelement content of bedrock by weathering products in tropical environments may be a serious complication to interpretation of airborne spectrometric data. Lateritic weathering concentrates uranium and thorium; lateritic soils may produce strong anomalies, which do not reflect the low uranium and thorium contents of the underlying bedrock. Adams and Richardson [22] investigated the radioelement concentrations in bauxites and found thorium and uranium enrichment by factors of 40 and 10, respectively, in bauxites derived from carbonate rocks. Bauxites derived from shales and igneous rocks showed enrichment of uranium and thorium by factors of about 4 to 5. Adams and Richardson [22] further estimated that during the lateritic weathering, which produced bauxite with high uranium contents relative to the parent rock, 20 to 75% of the uranium originally in the parent rock had been leached and removed. This could provide a source of uranium for deposition in suitable host rocks to form nearby deposits. The low potassium content of the lateritic material studied by Adams and Richardson could be a useful criterion for distinguishing this type of uranium enrichment from anomalously uraniferous rocks of uranium geochemical or metallogenic provinces, as defined by Garrett and Darnley [23].

## RESULTS OF AIRBORNE GAMMA-RAY SURVEYS IN TROPICAL AREAS

The GSC has been involved with technical specifications and the technical management of two spectrometer surveys in tropical regions.

### Ivory Coast

From 1974 to 1977 an airborne spectrometer survey of the Ivory Coast was carried out under a cooperative agreement with Canada, under

the auspices of the Canadian International Development Agency. The survey was flown with approximately 3200 ml of sodium iodide detectors, at a terrain clearance of 150 m, with line spacing of 500 m. Results were compiled into aeroradiometric maps at scales of 1:50 000 and 1:1 000 000. Because the survey was conducted with a small detector array, as an adjunct to an aeromagnetic survey, only the contour maps of total count were produced.

The results are evidence of the successful application of airborne gamma-ray surveying in a tropical region, which included savannahs or grasslands in the northern part of Ivory Coast, and dense forest in the south-central part of the country.

The aeroradiometric contour maps show correlations with the aeromagnetic map and distinguish several of the mapped geologic units. Within the area of tropical forest south and west of Daloa, two-mica granites are clearly outlined along their contacts with biotite granites and metasediments. The distinction of the different granites suggests that the radiometric response may be due to compositional differences in the granites and not simply due to differing amounts of exposure of different rock types. The radiometric contours similarly outline geologic units in the savannahs of the northern part of the country.

The Rapport Annuel 1977, of the Société pour le Développement Minier de la Côte d'Ivoire, states that correlation of radiometric data with mineralogic and geologic information resulted in the selection (using U/Th ratios from flight line profiles, A. Larochelle, personal communication) of a number of interesting zones, many of which had indications of uranium mineralization.

## **Brazil**

The Geological Survey of Canada served in a technical advisory role for a Brazil/Canada Geophysical Project from 1972 to 1979 through the planning stages, the operations and the data compilation. The project included an airborne gamma-ray spectrometer survey of the area between 5°S and 16°S, 48°W and 51°W. The survey was flown with 25 000 ml of sodium iodide detectors, at a terrain clearance of 150 m, with flight lines located at 2 km and in some parts of the area at 1 km.

Results of the survey are not yet completely compiled and only preliminary comments can be made at this time. In the savannahs of the southern part of the survey contour maps of total count, uranium and thorium all show patterns that correlate with the geologic maps. Regions of uranium enrichment can be seen on the maps.

In much of the tropical forest-covered northern part of the survey area, flight line profiles show traces not unlike profiles over the Canadian Shield. There is considerable variation in radioelement concentrations, with values

exceeding 3% K, 10 ppm eU and 20 ppm eTh. The Brazilian profiles also show correlations from flight line to flight line. Although there are some areas where the profiles are flat, showing K, eU, and eTh concentrations of approximately zero, for most of the area of tropical forest the airborne gamma-ray spectrometric method appears to be a viable exploration method.

## SUMMARY

In addition to the factors that must be considered in the planning of any airborne gamma-ray spectrometric programme, and the instrumental and environmental effects for which corrections must be applied in compiling survey results, airborne spectrometry in tropical and rain forest areas will be accompanied by problems specifically related to the area. In particular, problems arising from vegetation, which may affect altimeter measurements, attenuate radiation from the ground, and the redistribution of radionuclides during tropical weathering and soil development will complicate data correction and interpretation. Nevertheless, results of airborne gamma-ray spectrometer surveys in Africa and South America indicate that useful data for uranium exploration can be obtained in tropical areas.

## REFERENCES

- [1] DARNLEY, A.G., The advantages of standardizing radiometric exploration measurements and how to do it, CIMM Bull. **70** (1977) 91.
- [2] HARRINGTON, H.J., "Morphostructural regions of South America", Handbook of South American Geology (JENKS, W.F., Ed.), Geol. Soc. Am. Mem. **65** (1956) xiii.
- [3] DARNLEY, A.G., "Airborne gamma-ray survey techniques - present and future", Uranium Exploration Methods (Proc. Panel Vienna, 1972), IAEA, Vienna (1973) 67.
- [4] DARNLEY, A.G., CHARBONNEAU, B.W., RICHARDSON, K.A., "Distribution of uranium in rocks as a guide to the recognition of uraniferous regions", Recognition and Evaluation of Uraniferous Regions (Proc. Panel Vienna, 1975), IAEA, Vienna (1975) 55.
- [5] CAMERON, G.W., ELLIOTT, B.E., RICHARDSON, K.A., "Effects of line spacing on contoured gamma-ray spectrometry data", Exploration for Uranium Ore Deposits (Proc. Symp. Vienna, 1976), IAEA, Vienna (1976) 81.
- [6] CHARBONNEAU, B.W., KILLEEN, P.G., CARSON, J.M., CAMERON, G.W., RICHARDSON, K.A., "Significance of radioelement concentration measurements made by airborne gamma-ray spectrometry over the Canadian Shield", Exploration for Uranium Ore Deposits (Proc. Symp. Vienna, 1976), IAEA, Vienna (1976) 35.
- [7] GRASTY, R.L., A calibration procedure for an airborne gamma-ray spectrometer, Geol. Surv. Can., Paper 76-16 (1976) 9.
- [8] GOLD, S., BARKHAU, H.W., SHLEIEN, B., KAHN, B., "Measurement of naturally occurring radionuclides in air", The Natural Radiation Environment (ADAMS, J.A.S., LOWDER, W.M., Eds), University of Chicago Press (1964) 369.

- [9] NEILSEN, U., The Forestry Radar Altimeter Tested in the Tropics, Forest Management Institute Information Report FMR-X-66, Canadian Forestry Service, Department of the Environment, Ottawa (1974).
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiometric Reporting Methods and Calibration in Uranium Exploration, Technical Reports Series No.174, IAEA, Vienna (1976).
- [11] KILLEEN, P.G., "Gamma-ray spectrometric calibration facilities — a preliminary report", Current Research, Geol. Surv. Can., Paper 78-1A (1978) 243.
- [12] GOWER, J.F.R., GRASTY, R.L., OLIVER, B.M., "Experiments with a standard inertial system", Inertial Technology for Surveying and Geodesy (Proc. 1st Int. Symp., 1977) (1977) 278.
- [13] GRASTY, R.L., GOWER, J.F.R., OLIVER, B.M., Inertial navigation for flight path recovery, Geol. Surv. Can., Paper 76-30 (1977) 12.
- [14] KOGAN, R.M., NAZAROV, I.M., FRIDMAN, Sh.D., Gamma spectrometry of natural environments and formations, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem (1971).
- [15] MAYNEORD, W.V., RADLEY, J.M., TURNER, R.C., The alpha activity of humans and their environment, Health Physics 1 (1959) 271.
- [16] EISENBUD, M., PETROW, H., DREW, R.T., ROSER, F.X., KEGEL, G., CULLEN, T.L., "Naturally occurring radionuclides in foods and waters from the Brazilian area of high radioactivity", The Natural Radiation Environment (ADAMS, J.A.S., LOWDER, W.M., Eds), University of Chicago Press (1964) 837.
- [17] MACFADYEN, D.A., GUEDES, S.V., "Air survey applied to the search for radioactive minerals in Brazil", Int. Conf. Peaceful Uses Atom. Energy (Proc. Conf. Geneva, 1955) 6, UN, New York (1956) 726; also in Exploration for Nuclear Raw Materials (NININGER, R.D., Ed.), Van Nostrand Company, Princeton (1956) 177.
- [18] FOOTE, R.S., "Time variation of terrestrial  $\gamma$  radiation", The Natural Radiation Environment (ADAMS, J.A.S., LOWDER, W.M., Eds), University of Chicago Press (1964) 757.
- [19] CHARBONNEAU, B.W., DARNLEY, A.G., Radioactive precipitation and its significance to high-sensitivity gamma-ray spectrometer surveys, Geol. Surv. Can., Paper 70-1, Part B (1970) 32.
- [20] PERTTUNEN, M., The lithologic relation between till and bedrock in the region of Hameen Linna, Southern Finland, Geol. Surv. Finl., Bull. 291 (1977).
- [21] PODOLAK, W.E., SHILTS, W.W., Some physical and chemical properties of till derived from the Meguma Group, Southeast Nova Scotia, Geol. Surv. Can., Paper 78-1A (1978) 459.
- [22] ADAMS, J.A.S., RICHARDSON, K.A., Thorium, uranium and zirconium concentrations in bauxite, Econ. Geol. 55 8 (1960) 1653.
- [23] GARRETT, R.G., DARNLEY, A.G., Regional geochemistry — its philosophy and use, Northern Miner (Nov. 28, 1974).

## DISCUSSION

P.D. TOENS: I have listened to the talk by Mr. Richardson with great interest, particularly since in Southern Africa we, too, have problems of overburden, mainly in the form of windblown sand and calcrete. It may, therefore, be of interest that we have found a correlation between magnetic and

radiometric responses in the Damara Orogenic belt, thus making it possible to predict the presence of uranium-bearing alaskites beneath a veneer of surficial deposits. These findings have been published in an open file, South African Atomic Energy Board Report No. PEL-260. The authors are B. Corner and D.I. Henthorn.

K.A. RICHARDSON: In the Canadian Shield we also find correlation between aeromagnetic and radiometric patterns. Such correlations give evidence that measurements of the surface radioactivity reflect the underlying geology. The GSC has flown magnetic vertical gradiometer surveys in northern Saskatchewan and northern Manitoba. These areas of active uranium exploration are almost completely covered by Athabasca sandstone or glacial overburden. The results of these surveys were discussed by L.J. Kornik in the Northern Miner, November 30, 1978. Kornik concludes that vertical gradient data can assist in exploration for uranium by providing a better understanding of the geology of the magnetic basement, the ability to trace out favourable lithologic units, and the possibility of more and better depth estimates to magnetic basement.

## LA PRERECONNAISSANCE GEOCHIMIQUE DE L'URANIUM

A. GRIMBERT

Commissariat à l'énergie atomique,

Paris,

France

### Abstract-Résumé-Resumen

#### THE GEOCHEMICAL ORIENTATION SURVEY FOR URANIUM.

Since it is not possible for all the emerged land and continental shelves to be covered by a general survey enabling the areas most favourable for the presence of uranium deposits to be pinpointed, there has to be a selection in order to establish priorities. Leaving aside economic and political considerations, this selection has so far been based on geological criteria that are very much open to subjective interpretation. To rectify this situation it is necessary to apply favourability characteristics that are specific and easy to measure, for example, the uranium content. To make a rapid assessment of the uraniferous nature of the geological formations that might be prospected, the geochemical prospecting methods should be based on the use of samples that are intercomparable, irrespective of the environmental conditions, while still being easy to take and to analyse. It is only monomineralic phases resistant to alteration that have a sufficiently stable composition for them to be intercompared under a wide variety of geological and climatic conditions. For convenience the choice has fallen on ilmenites, which are easy to sample in river sediments, are suitably resistant to alteration, have 'fixed uranium' contents ranging from 1 to 10 ppm, depending whether they come from 'sterile' or 'fertile' uranium areas, and are of a stable nature reflecting their formation medium or post-magmatic transformation. Ilmenites are likely to exhibit the properties required for their use in a geochemical orientation survey for uranium, but their effectiveness under all the conditions encountered has yet to be demonstrated. If they prove successful, they could make a useful contribution to the selection of regions where prospecting efforts could be concentrated on the basis of a rapidly established objective criterion and at very reasonable cost.

#### LA PRERECONNAISSANCE GEOCHIMIQUE DE L'URANIUM.

Comme il n'est pas possible de soumettre la totalité des terres émergées et des plateaux continentaux à une prospection générale permettant de repérer les zones les plus favorables à la présence de gisements uranifères, il faut effectuer un choix pour établir des priorités. Si l'on fait abstraction des conditions économiques et politiques, ce choix a été basé jusqu'ici sur des critères géologiques qui laissent une part importante à la subjectivité. Pour remédier à cette situation, il faut avoir recours à des caractères concrets et facilement mesurables de favorabilité, comme par exemple le contenu en uranium. Pour évaluer rapidement le caractère uranifère des formations géologiques susceptibles d'être prospectées, les méthodes géochimiques de prospection doivent avoir recours à des échantillons comparables entre eux, quelles que soient les conditions du milieu, tout en étant faciles à prélever et à analyser. Seules les phases monominérales résistant à l'altération ont une permanence de composition suffisante pour pouvoir être comparées entre elles dans des conditions géologiques et climatiques très diverses. Pour des raisons de commodité, on a choisi les ilménites qui sont faciles à prélever dans les alluvions fluviales, résistent bien à

l'altération, ont des teneurs en "uranium fixé" pouvant varier de 1 à 10 ppm, suivant qu'elles proviennent de régions "stériles" ou "fertiles" en uranium et font preuve d'une permanence de caractère reflétant leur milieu de formation ou de transformation post-magmatique. Les ilménites sont susceptibles de présenter les qualités requises pour être utilisées dans une préreconnaissance géochimique de l'uranium, mais il reste à faire la preuve de leur efficacité dans toutes les conditions rencontrées. En cas de succès, elles pourront contribuer utilement au choix des régions sur lesquelles les efforts de prospection seront concentrés, en faisant appel à un critère objectif obtenu rapidement pour une dépense très modeste.

#### RECONOCIMIENTO GEOQUIMICO DEL URANIO.

Como no es posible someter la totalidad de las tierras emergidas y de las mesetas continentales a una prospección general que permita determinar cuáles son las zonas más favorables para la presencia de yacimientos uraníferos, hay que realizar una selección para establecer prioridades. Si se prescinde de las condiciones económicas y políticas, esta selección se ha basado hasta ahora en criterios geológicos en los que desempeña un papel importante la subjetividad. Para remediar esta situación, hay que recurrir a caracteres concretos y fácilmente mensurables de favorabilidad, por ejemplo, el contenido de uranio. Para evaluar rápidamente el carácter uranífero de formaciones geológicas susceptibles de prospección, los métodos geoquímicos de prospección deben utilizar muestras comparables entre ellas, sean cuales fueren las condiciones del medio, y que sean fáciles de tomar y analizar. Solo las fases monominerales resistentes a la alteración poseen una composición permanente suficiente para compararlas entre ellas en condiciones geológicas y climáticas muy distintas. Por razones de comodidad, se han escogido las ilménitas que son fáciles de tomar en aluviones fluviales, que resisten bien a la alteración y que poseen un contenido de "uranio fijo" comprendido entre 1 y 10 ppm, según que procedan de regiones "estériles" o "fértils" en uranio, y cuyo carácter permanente refleja su medio de formación o de transformación postmagmática. Las ilménitas son susceptibles de presentar las calidades requeridas para su utilización en un prerreconocimiento geoquímico del uranio, pero queda por demostrar su eficacia en todas las condiciones existentes. En caso de éxito, podrán contribuir útilmente a la selección de regiones en las que se concentrarán los esfuerzos de prospección, basándose en un criterio objetivo obtenido rápidamente con gastos muy modestos.

#### I. SITUATION ACTUELLE DE LA PROSPECTION GEOCHIMIQUE DE L'URANIUM

Après des débuts difficiles, la prospection géochimique de l'uranium destinée à mettre en évidence les anomalies dans la distribution de cet élément est universellement utilisée aux différents stades de la recherche minière, dans des conditions géologiques, morphologiques ou climatiques diverses, en faisant varier le mode opératoire et principalement la nature des échantillons prélevés et le mode d'échantillonnage.

En *prospection générale* (1/50 000) destinée à repérer, dans une région de quelques milliers de km<sup>2</sup>, les zones présentant des caractères favorables à l'existence de gisements uraníferes, on utilise de préférence les eaux superficielles et les alluvions des réseaux de drainage avec des intervalles compris entre 500 et 2000 m.

En l'absence de réseau hydrographique, on peut avoir recours aux sols à large maille (1000 m) environ.

En *prospection détaillée* (1/10 000) destinée à localiser au sein d'une zone favorable de quelques dizaines de km<sup>2</sup>, l'existence d'anomalies géochimiques pouvant résulter de gisements. A ce stade de la prospection, on utilise les eaux superficielles et souterraines ainsi que les alluvions fluviales, avec des intervalles de 100 à 300 m. On peut utiliser également les dépôts de berge et les sols superficiels à une maille d'environ 100 m.

En *prospection systématique* (1/2000) qui a pour but de préciser la situation, l'extension et l'intérêt d'une anomalie géochimique par rapport au milieu environnant, on utilise de préférence des échantillons de roches ou de sols superficiels et profonds, prélevés à intervalles rapprochés de 10 à 20 m.

C'est donc en faisant varier principalement la nature de l'*échantillon* prélevé et la *maille d'échantillonnage*, que l'on peut passer d'un stade à l'autre en dosant l'*uranium mobile* qui reste à tous les stades le meilleur indicateur de la présence d'uranium.

La recherche d'accompagnateurs (Ra, Rn, He, etc.) n'intervient que pour résoudre des problèmes difficiles.

## II. NECESSITE D'UN STADE PRELIMINAIRE: LA PRERECONNAISSANCE

Le choix des zones à soumettre à une prospection générale est souvent fait en fonction des similitudes apparentes présentées par des caractères géologiques incertains.

Comme dans la plupart des cas les connaissances sur la géologie de la région qui a retenu l'attention sont incomplètes, il serait préférable d'avoir recours à des critères concrets, rapidement mesurables de façon économique, aussi bien dans les formations cristallines que dans les formations sédimentaires détritiques et sous n'importe quel climat, pour choisir à l'échelle du 1/500 000 les zones à prospector en priorité.

Le *caractère uranifère* semble être le critère mesurable à retenir. La scintillométrie n'est pas suffisante dans certaines conditions du milieu naturel soumis à l'altération.

La prospection géochimique semble par contre pouvoir tenir ce rôle, à condition de déterminer la nature de l'échantillon à prélever et la densité de l'échantillonnage que l'on doit adopter pour obtenir un résultat fiable dans de bonnes conditions de rapidité et d'économie.

Il convient de comparer des résultats obtenus dans des conditions identiques, c'est-à-dire sur des échantillons comparables entre eux (caractères chimiques et physiques très voisins).

### III. CHOIX DES PRELEVEMENTS CONVENABLES – LES PHASES MONOMINERALES

Si l'on passe en revue les différents types d'échantillons que l'on utilise habituellement en prospection géochimique, on constate que les eaux superficielles et les alluvions ont une dispersion importante en aval des concentrations uranifères, mais la qualité des échantillons varie en fonction de la nature des formations géologiques drainées et des conditions climatiques rencontrées.

Il est difficile de comparer entre eux des échantillons d'eaux prélevés dans des conditions géologiques et climatiques différentes, sans procéder à une analyse totale, ce qui entraîne des délais et des frais importants.

Pour avoir recours aux eaux superficielles et aux alluvions dans les mêmes conditions de milieu, on est obligé de limiter à l'échelle régionale le domaine de leur utilisation.

Les eaux souterraines, les sols et les roches reflètent plus encore que les précédents les caractères locaux des points d'échantillonnage.

Les échantillons solides en particulier, par suite de l'hétérogénéité de leur composition, sont étroitement soumis aux caractères géologiques et climatiques et ne donnent que des renseignements très ponctuels.

Aucun de ces matériaux ne remplit donc les conditions requises pour permettre une comparaison valable des résultats obtenus dans différents milieux.

Il faut faire appel à des phases monominérales présentant une permanence suffisante de leur composition chimique tout en résistant aux altérations et en étant faciles à isoler.

### IV. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES ILMENITES

Les minéraux lourds des fonds de batées, obtenus à partir du lavage d'alluvions prélevées en lit vif, semblent remplir parfaitement les conditions suivantes:

- facilité et rapidité de prélèvement,
- possibilité de séparation sur place des minéraux constitutants,
- permanence des caractères minéralogiques,
- résistance à l'altération.

Parmi les minéraux lourds des alluvions, le choix s'est porté sur les ilménites ( $\text{FeTiO}_3$ ), pour des raisons essentiellement pratiques. En effet:

- elles ont un caractère ubiquiste puisque c'est un minéral accessoire de beaucoup de roches ignées et métamorphiques que l'on trouve également dans les sédiments détritiques qui en résultent; cela leur assure une large répartition géographique;
- leur composition varie dans des limites étroites et, si l'on signale parfois la présence de  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ainsi que de nombreux éléments

traces (V, Cu, Zn, etc.) suivant les conditions de gisements, les ilménites n'en restent pas moins suffisamment voisines pour être comparables entre elles dans la prospection géochimique;

- elles traduisent les caractères des milieux dans lesquels elles se sont formées puisque, lors du refroidissement, les oxydes de fer et de titane s'ajustent aux conditions du milieu par des phénomènes d'exsolution et d'oxydation. Elles sont sensibles aux transformations tardi- ou post-magmatiques de sorte que leur composition correspond souvent à des rééquilibres sub-solidus tardifs dans un milieu susceptible d'être plus ou moins uranifère;
- elles résistent à l'altération qui peut provoquer une pseudomorphose en goethite et en oxydes de fer hydratés ou en leucoxène par départ du fer. Il s'agit d'un processus très lent qui ne se produit complètement que pour des ilménites ayant séjourné très longtemps dans des formations sédimentaires anciennes;
- elles sont faciles à séparer des autres minéraux lourds recueillis en fonds de batées, en ayant recours à des séparations densimétriques et magnétiques permettant d'éliminer également les ilménites dont l'altération a modifié la densité et la susceptibilité magnétique.

## V. ENQUETE D'ORIENTATION

Il aurait fallu procéder à une enquête préliminaire, pour déterminer si les ilménites conviennent pour une préreconnaissance géochimique à large maille faite à l'échelle du 1/500 000, et préciser le mode d'échantillonnage et la densité des prélèvements, en opérant dans des régions reconnues uranifères.

Cela n'a pas été possible et il a fallu avoir recours à des échantillons prélevés pour la prospection alluvionnaire par le Bureau de recherches géologiques et minières.

Les trente échantillons choisis pour un premier essai ont été prélevés dans le Massif armoricain constitué par des formations granito-gneissiques hercyniennes formées à partir de sédiments.

Ces échantillons d'ilménites (2 à 3 g), obtenus par séparation densimétrique (iodure de méthylène), puis magnétique de la fraction lourde (séparateur Frantz) ont été soumis à l'analyse de l'uranium suivant les techniques habituelles de la Section de prospection géochimique du Commissariat à l'énergie atomique.

Après broyage, chaque échantillon de 500 mg ou 1 g, suivant la quantité disponible, dont l'homogénéité a été vérifiée à la loupe binoculaire, a été soumis aux dosages suivants:

- *Dosage de l'uranium mobile*, correspondant à l'U qui a pu se fixer dans les fissures ou en surface de la pellicule superficielle des ilménites à partir de l'U en solution dans les eaux en contact.

TABLEAU I. RESULTATS DU DOSAGE D'ECHANTILLONS D'ILMENITE PRELEVES DANS LE MASSIF ARMORICAIN

N°	U total ppm	U mobile ppm	U fixé ppm	N°	U total ppm	U mobile ppm	U fixé ppm
1	3,3	1,5	1,8	16	8,2	5,8	2,4
2	6,4	2,6	3,8	17	0,8	0,5	0,3
3	3,9	1,2	2,7	18	1,4	0,3	1,1
4	2,8	1,6	1,2	19	4,1	2,7	1,4
5	4,6	1,4	3,2	20	1,1	0,8	0,3
6	11	2,7	8,3	21	1,3	0,7	0,6
7	1,1	0,6	0,5	22	0,9	0,5	0,4
8	1,4	1,2	0,2	23	0,6	0,3	0,3
9	1,1	1,1	0	24	1,1	0,6	0,5
10	1,1	0,8	0,3	25	1,5	0,5	1
11	1,6	0,6	1	26	3,8	1,6	2,2
12	3,8	0,3	3,5	27	1,8	0,7	1,1
13	5,5	1	4,5	28	1,3	0,3	1
14	5,9	1,3	4,6	29	8,6	7,1	1,5
15	4	1	3	30	0,6	0,5	0,1

— *Dosage de l'uranium total*, pour déterminer par différence l'uranium fixé correspondant à celui qui a été retenu au cours de la formation ou de la transformation du minéral.

Les résultats du tableau I font apparaître des différences sensibles entre l'U fixé des ilménites provenant de certaines formations réputées fertiles en uranium, comme le granite de Pontivy (n°s 13, 14, 15) et celui des ilménites d'autres formations réputées stériles, comme le granite de Plouaret (n° 8).

Pour vérifier la permanence de ces résultats avec des ilménites prélevées à quelques mètres d'intervalle dans ces deux régions, on a eu recours au dosage de trente nouveaux échantillons dont les résultats apparaissent sur le tableau II.

On peut en conclure que les ilménites prélevées dans une même zone présentent une homogénéité de teneurs en U tout à fait satisfaisante, ce qui donne à chaque échantillon une représentativité acceptable en cas d'échantillonnage à large maille.

TABLEAU II. RESULTATS DU DOSAGE D'ECHANTILLONS D'ILMENITE  
PRELEVES SUR DEUX SITES TEMOINS

		U total (ppm)		U mobile (ppm)		U fixé (ppm)	
PLOUARET							
n° 590	1	3,5		2,0		1,5	
	3	3,3	3,5 ± 0,2	2,3	2,1 ± 0,2	1,0	1,4 ± 0,4
	4	3,5		1,9		1,6	
	5	3,6		2,2		1,4	
	6	1,6		0,5		1,1	
n° 846	7	1,6		0,5		1,1	
	8	1,3		0,4		0,9	
	9	1,6		0,6		1,0	
	10	1,6	1,5 ± 0,4	0,5	0,5 ± 0,1	1,1	1,0 ± 0,3
	11	1,5		0,5		1,0	
	12	1,9		0,6		1,3	
	13	1,3		0,5		0,8	
	14	1,4		0,4		1,0	
	15	1,1		0,4		0,7	
PONTIVY							
n° 3199	16	7,4		1,2		6,2	
	17	6,2		1,3		4,9	
	18	6,3		1,4		4,9	
	19	6,9		1,7		5,2	
	20	5,5	6,2 ± 1,4	0,8	1,2 ± 0,5	4,7	5,0 ± 1,2
	21	5,4		1,3		4,1	
	22	5,8		1,4		4,4	
	23	6,6		1,1		5,5	
	24	6,0		1,3		4,7	
n° 3204	26	12,0		1,3		10,7	
	27	4,9		0,7		4,2	
	28	5,0	8,2 ± 3,8	0,9	1,0 ± 0,3	4,1	7,3 ± 3,4
	29	8,5		0,8		7,7	
	30	10,5		0,8		9,7	
n° 3207	31	11,0		0,7		10,3	
	32	11,0	11,0	1,3	1,0 ± 0,3	9,7	10 ± 0,3
	33	11,0		0,9		10,1	

## VI. CONCLUSION

Des travaux d'ordre méthodologique restent à faire afin de préciser les conditions d'utilisation des ilménites et la densité d'échantillonnage pour la préreconnaissance des régions uranifères.

Dès à présent, le stade de l'utilisation de routine est possible sans moyen supplémentaire, puisque l'on fait couramment:

- des prélèvements de fonds de batées,
- la séparation des minéraux lourds,
- le dosage de l'U mobile et de l'U total.

Il ne servirait à rien de prolonger les études de laboratoire, comme, par exemple, pour déterminer le moment et le mode de fixation de l'U dans les ilménites. Par contre, après quelques milliers de dosages d'U dans les ilménites provenant de régions uranifères et de régions non uranifères du monde entier, soumises à des conditions climatiques variées, il sera possible de se prononcer sur l'intérêt ou le manque d'intérêt de cette technique de préreconnaissance.

D'autres idées sont également susceptibles d'en résulter pour que l'on puisse à l'avenir s'appuyer sur un critère objectif pour choisir rapidement et à peu de frais les régions qui méritent d'être prospectées en priorité pour la découverte de gisements uranifères.

C'est pourquoi je soumets cette idée, avec l'espoir qu'elle fera naître une collaboration internationale active entre tous les prospecteurs qui s'intéressent à la recherche de l'uranium.

Il ne s'agit pas de découvrir des gisements, ni même des zones favorables à l'existence de gisements, ce qui est le rôle de la prospection générale, mais de guider le choix des régions présentant des caractères favorables pour la prospection des gisements uranifères.

Ce choix ne doit pas être uniquement le résultat de considérations théoriques, dans lesquelles la subjectivité a une part prépondérante, mais la conclusion de données chiffrées, fournies par des analyses susceptibles de nous renseigner rapidement et à peu de frais sur la présence de l'uranium qui constitue le caractère le plus favorable à l'existence de gisements uranifères.

Le choix des ilménites n'est pas encore bien assuré, d'autres minéraux sont possibles, mais il est nécessaire, à un certain moment où les chances de succès ne sont pas négligeables, de quitter le domaine du laboratoire et des essais à petite échelle pour se lancer dans l'application en routine qui seule est susceptible de fournir suffisamment d'expériences pour déterminer les meilleures conditions d'utilisation des ilménites ou au contraire leur manque d'intérêt.

## BIBLIOGRAPHIE

ADAMS, S., CURTIS, H., HAFEN, P., "Alteration of detrital magnetite-ilmenite in continental sandstones of Morrison formation (New Mexico)" in Formation of Uranium Ore Deposits (C.R. Coll. Athènes, 1974), AIEA, Vienne (1974) 219.

BERTHOLLET, P., Méthodes d'analyse utilisées par la Section de géochimie (Uranium, Radon, Radium), Rapport CEA R-3557 (1968).

DE GRYS, A., Copper and zinc in alluvial magnetites from Central Ecuador, Econ. Geol. (1970) 714.

DE LA ROCHE, KEIM, BOLFA, Contribution à l'étude de l'altération des ilménites (Sud-Est de Madagascar), Sciences de la terre, T.VIII, n<sup>os</sup> 3 et 4 (1961).

GRIMBERT, A., "Use of geochemical techniques in uranium prospecting" in Uranium Prospecting Handbook, Inst. Mining Metal, London (1972) 110.

GUIGUES, J., DEVISMES, P., La prospection minière à la batée dans le Massif Armoricaïn, Mémoire BRGM n<sup>o</sup> 71 (1969).

KARKHANAVEH, MONNIN, Altération de l'ilménite, Econ. Geol. 54 (1959) 1095.

RUHLMANN, F., Quelques observations métallographiques d'associations uranium-titane et uranium-phyllites, Note intérieure COGEMA (1978).

## DISCUSSION

J.A. FERNANDEZ: Have you carried out any experiments on the variations in the labile-uranium/total-uranium ratio as a function of the diameter of the ilmenite particles from a single sample?

A. GRIMBERT: I have not been able to carry out experiments on the variations in this ratio. This is a problem which requires further study and which could result in a restriction to a single granulometric fraction.

M.W. FLÜCKIGER: How do you carry out the chemical etching of the labile uranium?

A. GRIMBERT: The mobile uranium is determined after etching with dilute nitric acid (2.5N) while the total uranium is found from etching with nitrogen fluoroperchloride.

M. TAUCHID: This is not a question but a comment. As part of an IAEA technical assistance programme we just completed a heavy mineral survey for mobile uranium (acid leach), covering an area of 13 000 km<sup>2</sup> in the Philippines. We tried the technique over known mineralization. The results indicate that it was useful to outline the uranium district.

A. GRIMBERT: I did not know that you had carried out this experiment in the Philippines and I am pleased to hear that it was successful. I believe that it

is preferable to use only a single mineral species so as to get results which can be compared.

C. PREMOLI: This is a comment rather than a question. In Australia there has been an increasing interest in uranium determination in resistates. Both private companies and government agencies are quite active in this field, although the preferred mineral phase for these studies is zircon rather than ilmenite. The method seems to have a good applicability for orthomagmatic types of deposits.

A. GRIMBERT: The reasons for my choice are that the ilmenites are widely distributed and are easy to sample (with a wash trough) and to separate (with an electromagnet). It is possible that they are not the best resistates for preliminary surveys; this is something which might well be studied further.

M. MARTIN: I would be interested to know if the mobile uranium which appears in the surface film on the microfissures of the ilmenites comes from an external source or from weathering of the ilmenites themselves. Its importance as an indicator of favourable zones may depend on the answer to this question.

A. GRIMBERT: I do not know if the mobile uranium in the surface crust of the ilmenites comes from an external source or from weathering of the rocks themselves. That is why it seemed to me preferable to ignore it and to restrict myself to the fixed uranium. It is possible that the total uranium would be a better guide. This is an interesting subject for further study and I hope that you will have the chance to carry out this work.

# TWO CONCEPTS OF URANIUM GEOLOGY IN THE UNITED STATES OF AMERICA THAT MAY BE USEFUL IN LATIN AMERICAN URANIUM EXPLORATION

D.L. CURRY

US Department of Energy,  
Washington, DC,  
United States of America

## Abstract-Resumen

### TWO CONCEPTS OF URANIUM GEOLOGY IN THE UNITED STATES OF AMERICA THAT MAY BE USEFUL IN LATIN AMERICAN URANIUM EXPLORATION.

Two concepts of the origin and deposition of uranium are described that are somewhat different from the conventional sandstone deposits of the United States of America. The first concept relates to granites as source and host rocks. Work done in the Granite Mountains of Wyoming provides considerable support for a granitic source. Calculations indicate that between 50 and 75% of the uranium has been leached from the granite to depths of nearly 400 m, and could have been source rocks for deposits in the Tertiary sandstones in adjacent basins. Areas of intense fracturing are also hosts for redeposition and concentration of uranium in granites of the Granite Mountains. The second concept describes resurgent cauldrons as source and host rocks. The development of resurgent cauldrons provides a variety of geological settings favourable for both intra-caldera deposits and deposits forming in adjacent basins. A collapsed caldera may contain a lake into which sediments from ejected material carrying uranium could be carried and into which direct contributions of uranium could come from the underlying magma. Weathering of uranium-bearing material deposited outside the caldera could provide uranium to be redeposited in conventional deposits such as roll fronts. Geological investigations carried out in the Great Basins of Utah and Nevada are cited.

### DOS CONCEPTOS DE GEOLOGIA DEL URANIO EN LOS ESTADOS UNIDOS DE AMERICA DE POSIBLE UTILIDAD EN LA EXPLORACION DE URANIO EN AMERICA LATINA.

Se describen dos conceptos relativos al origen y depósito del uranio que son algo distintos de los referentes a los yacimientos de areniscas tradicionales de los Estados Unidos. El primero se refiere a granitos como roca madre y roca hospedadora. Los trabajos realizados en las Granite Mountains de Wyoming han aportado considerables indicios de que las rocas madre son granitos. Los cálculos indican que del 50 al 75% del uranio ha sido lixiviado desde el granito hasta profundidades de casi 400 metros, el cual podría haber constituido la roca madre de los yacimientos en areniscas terciarias de cuencas adyacentes. Las áreas de fracturación intensa son también hospedadoras para el redepósito y concentración del uranio en granitos de las Granite Mountains. El segundo concepto se refiere a calderas resurgentes como rocas madre y hospedadoras. El desarrollo de calderas resurgentes crea una serie de ambientes geológicos favorables para los yacimientos dentro de las calderas y los formados en cuenca adyacentes. Una caldera desplomada puede contener un lago al que podrían afluir sedimentos resultantes del material arrojado portadores de uranio y en el que podrían entrar aportaciones directas de uranio del magma subyacente. La meteorización del material uranífero depositado fuera de la caldera podría ser la causa de que el uranio se redeposite en yacimientos tradicionales como los frentes ondulados. Se mencionan las investigaciones geológicas efectuadas en las grandes cuencas de Utah y Nevada.

Financial exploration incentives established in the late 1940s by the United States Atomic Energy Commission (USAEC) to encourage exploration for and discovery of uranium deposits in the United States of America (USA) resulted in far more discoveries in sandstone rocks than in any other environment. However, exploration successes in non-sandstone environments in other parts of the world have encouraged some investigation of non-sandstone environments in the USA. The purpose here is to discuss two evolving concepts that depart somewhat from the conventional sandstone model in the USA. These concepts hold promise of being useful in uranium exploration in the USA, and may provide some geological 'food-for-thought' for use in Latin American countries. The principal areas of discussion are in the states of Wyoming, Nevada, and Utah.

## GRANITIC URANIUM SOURCE/HOST ROCKS

For many years a controversy has continued regarding the source of uranium in sandstone-type deposits in the USA. In the 1950s the controversy centred around whether the uranium was transported by solutions from deep-seated sources (hydrothermal), or by meteoric waters from shallow sources (supergene). Support for hydrothermal sources has faded in the face of overwhelming evidence of supergene processes in most sandstone uranium districts. However, a second aspect that still persists is whether the uranium in the supergene process was derived from volcanic or plutonic igneous rocks. Many geologists favour a tuffaceous origin for the uranium in most sandstone districts, but derivation from plutonic igneous rocks still has substantial support, particularly for Wyoming districts where recent studies have provided additional support for a granitic source.

As reported by Rosholt and Bartels [1], radiometric age-dating studies of scattered surface samples of granitic rocks from the Granite Mountains, Wyoming (Fig. 1), by the United States Geological Survey (USGS) encountered an apparent deficiency of uranium with respect to its lead daughter isotopes. Subsequent additional analyses of Granite Mountains samples, including surface samples and core from two boreholes, GM-1 and GM-2 (Fig. 2), spaced 20 m apart and drilled to depths of 410 m and 475 m, supported Rosholt's and Bartels' finding of a uranium deficiency. The calculations indicate that 50 to 75% of the uranium has been removed from the analysed samples of alkali granite to depths as great as 390 m [2]. The results of these studies have strengthened support for the concept of a granitic source for the uranium in this region, although a possibly significant contribution of uranium from tuffaceous source rocks has not been ruled out.

The Granite Mountains (Fig. 1) are a west-northwesterly-trending mountain range about 115 km long and 25 km wide located in central Wyoming. The range consists of Precambrian granitic and metamorphic rocks that are mostly buried by Middle and Late Tertiary tuffaceous sedimentary rocks. The area of the mountains

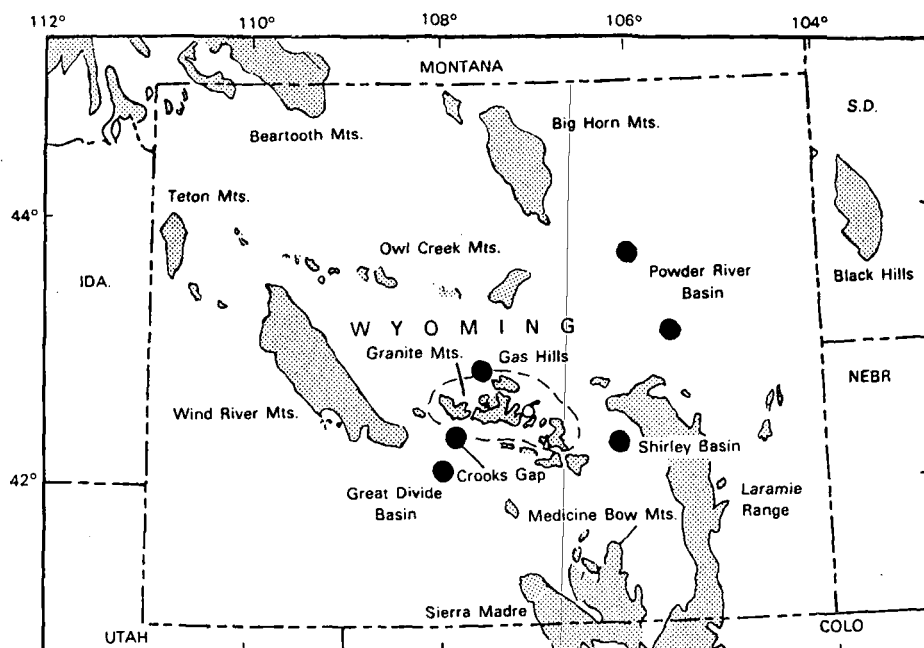


FIG.1. Index map of the Granite Mountains, Wyoming, showing the area of Precambrian rocks (patterned) and location of principal uranium districts in Tertiary rocks (dots). (Modified after Stuckless and Peterman [22].)

is of comparatively low relief and ranges in elevation from 1750 m to 2500 m. The present climate is semi-arid, with annual precipitation amounting to 30 to 40 cm, and temperatures varying from  $-30$  to  $+40^{\circ}\text{C}$ . Vegetation consists of grasses and sparse low brush.

To date, only a small quantity of uranium has been produced from the Granite Mountains. The ore was mined from an adit in a vein-like occurrence near the southeast end of the range. However, several important sandstone uranium districts are close by (Fig. 1). The Gas Hills to the north and Crooks Gap to the south are both within 25 km of the mountains. The Shirley Basin is about 60 km to the east, the Powder River Basin is 125 km to the northeast, and the Great Divide Basin is 40 km to the south. The uranium deposits in all of these areas are of the roll type, and occur in fluvial arkosic sediments of Early Eocene and Late Palaeocene age. The arkoses were derived principally from the Granite Mountains, although the Powder River Basin arkoses were probably derived in part from other granitic-source areas in southeastern Wyoming. Deposition of these sediments resulted from uplift of the Granite Mountains and attendant erosion during the Laramide orogeny in Late Cretaceous and Early Tertiary times. The area probably

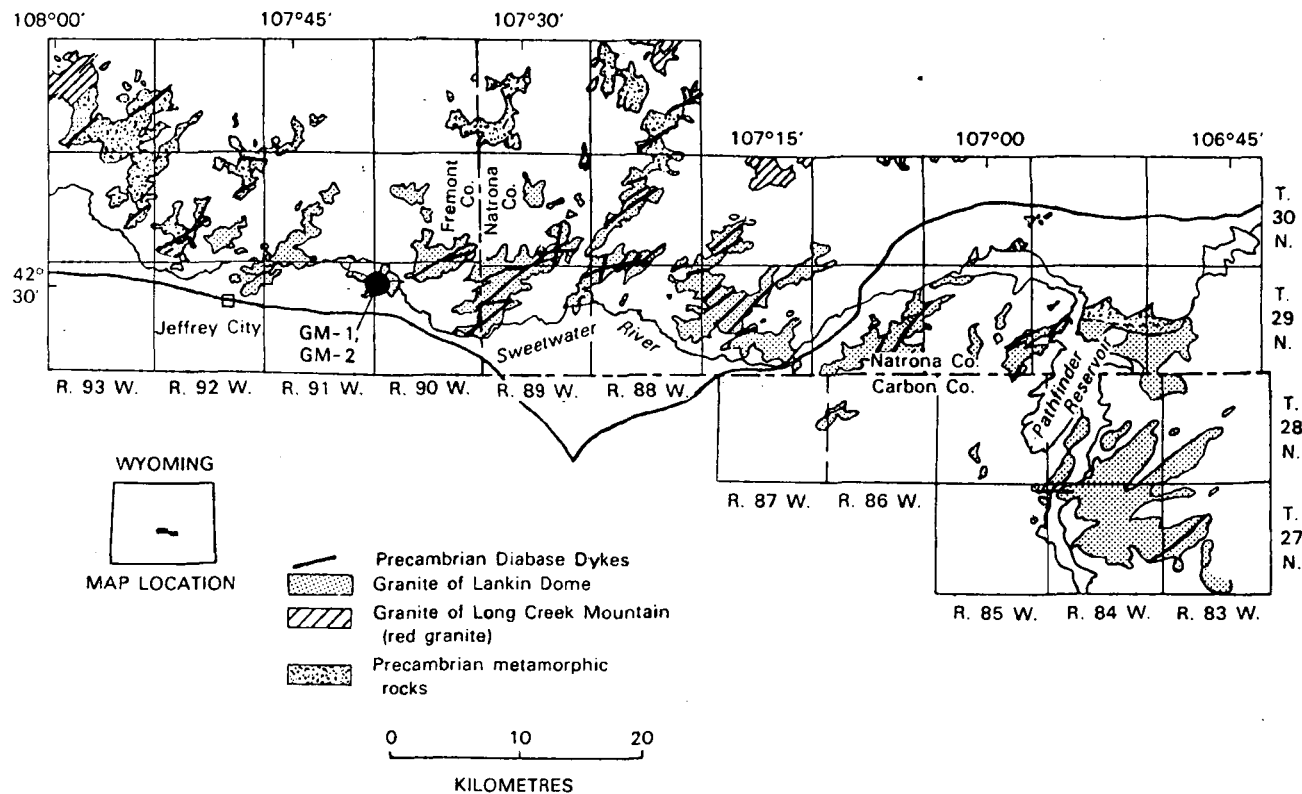


FIG.2. Generalized Precambrian geology of the Granite Mountains region, Wyoming. (Geology from Peterman and Hildreth [3] and Stuckless and Nkomo [4].)

attained a relief of about 2500 m during the Laramide orogeny. The present lower relief is attributed both to erosion and subsidence of the mountain range along bounding faults to the north and south during Late Tertiary time.

The Precambrian rocks of the Granite Mountains consist of three major lithologies (Fig. 2), from oldest to youngest: (1) an assemblage of amphibolite-grade metamorphic rocks that crop out in the northwestern and northern parts of the range; (2) a batholith of granitic rocks in much of the rest of the range; and (3) northeasterly-trending diabase dykes that are nearly as old as the granites, but which intrude both the metamorphic and batholithic rocks [3].

The metamorphic rocks are mostly tonalitic to granitic gneisses, with some schists, amphibolites and serpentinites. The metamorphic rocks have been dated by various USGS investigators as slightly more than 2900 million years (m.y.) old.

The main body of exposed granite, referred to by Peterman and Hildreth [3] as the granite of Lankin Dome, is described as massive grey to white biotite granite and biotite alkali-feldspar granite. Stuckless and Nkomo [4] reported an underlying leucocratic phase of granite that was penetrated in USGS drill holes GM-1 and GM-2 (Fig. 2), near Lankin Dome. Two other granite phases of the batholith occurring in the northwestern part of the batholith are described [3] as a medium-grey, foliated muscovite-biotite granite and a massive to foliated light-grey to reddish-grey biotite granite. The latter granite may be somewhat older than the other two, having been dated at about 2640 m.y., compared with a date of about 2600 m.y. for the granite of Lankin Dome.

Analytical results reported by Rosholt and Bartels [1] indicated an average remnant uranium content of 4 to 5 ppm uranium for a few samples collected from outcrops and from two drill holes less than 10 m deep. This average is in close agreement with the average values of 282 sample results from the work of J.A.S. Adams, and of Malan and Sterling [5] for the USAEC; these samples were collected from or very near the surface but included a few non-igneous Precambrian rocks [5]. The USAEC and USGS results indicated that the uranium content for the Granite Mountains was about average for granites, as reported by Rogers and Adams [6]. However, the average thorium content of about 25 ppm in both the USAEC and USGS samples is about 40% higher than normal. Continued analyses of samples by the USGS, including many from drill holes, showed the remnant average uranium content to be considerably higher, particularly in the granite of Lankin Dome, the main granitic body in the Granite Mountains. Stuckless and co-workers [2] report the mean uranium and thorium content as  $11.5 \text{ ppm U} \pm 8.9 (1\sigma)$  and  $51.0 \text{ ppm Th} \pm 16.9 (1\sigma)$  for the biotite granite, and  $18.6 \text{ ppm U} \pm 8.0 (1\sigma)$  and  $13.3 \text{ ppm Th} \pm 7.9 (1\sigma)$  for the leucocratic granite. These uranium contents are two to three times normal for each rock type. Although the relative abundance of thorium is also two to three times the normal thorium content in the biotite granite, thorium content is nearly normal in the leucocratic granite.

In earlier USGS studies, Rosholt and Bartels [1] concluded that most of the apparent depletion of uranium from granite of the Granite Mountains resulted from leaching during Cenozoic time. Although the more recent USGS studies support this general hypothesis, they also indicate a more complex geological history for the region. Various isotope studies reported by Stuckless and Nkomo [4], particularly an anomalous whole-rock Pb-Pb ratio, show at least one Precambrian disruption of the uranium isotope decay series that indicates effects of a probable mild thermal event 1400 to 1700 m.y. ago. They estimate the uranium loss during this Precambrian event at 10 to 45%, and suggest that the mobilized uranium could have migrated to and possibly concentrated in a nearby favourable environment. Later studies show an even greater uranium loss during the Cenozoic after erosion stripped the overlying Palaeozoic and Mesozoic sedimentary cover from the Granite Mountains during the Laramide orogeny. Stuckless and Nkomo [4] concluded from the isotope studies, particularly Pb/U, that this uranium loss apparently took place within the last 40 m.y., and that the adjacent uranium districts were formed during this time by concentration of uranium derived from the granites.

Up to now, this discussion has dealt with apparent uranium loss. However, the recent USGS studies of drill cores have shown sporadic intervals of enrichment interspersed with the depleted zones, as indicated by a sample from USGS core hole GM-1 (Fig. 2) in the central Granite Mountains that yielded 1459 ppm uranium at 50 m depth. Stuckless and Nkomo [4] report that the only recognized feature possibly associated with enrichment was fracturing, which was found to be intense in the very enriched zone just mentioned; enriched fractures were observed in several other core samples. Conversely, most of the uranium-depleted core samples were unfractured.

Stuckless and Nkomo [4] drew several conclusions from the Granite Mountains studies regarding characteristics that may make one granite a better source rock for uranium than another: (1) uranium seems to be more depleted in granites with a higher biotite content, possibly reflecting permeability of biotite [7] and thus greater fluid transmissivity and consequent leaching of uranium in granites richer in biotite; and (2) higher than average contents of alkali, silica, and thorium seem to correlate with higher initial uranium content. The granite of Lankin Dome possesses the above two criteria to a greater degree than the other granites to the northwest, and exhibits greater uranium loss.

## CONCLUSIONS – URANIUM SOURCE/HOST ROCKS

A number of conclusions, both fact and postulation, can be reached regarding the Granite Mountains studies of uranium mobility by the USGS:

- (1) From the isotopic data, substantial leaching of uranium from the Granite Mountains seems clearly established, particularly to shallow depths,

even though the granite does not exhibit unusual surficial weathering or alteration characteristics.

- (2) Assuming that a significant part of the leached uranium was indeed removed from the Granite Mountains during Cenozoic time, the granite could have been the predominant source of uranium in the deposits in Tertiary sandstones of adjacent basins.
- (3) Local uranium enrichment in samples from drill holes suggests that perhaps a substantial part of the leached uranium may have been redistributed and locally concentrated within the granite, rather than having been removed from it. A study of the batholith to search for the most intensely fractured zones or other geologic features that might have influenced substantial localization of uranium deposits, is warranted preparatory to possible exploration drilling.
- (4) Further study is needed of the suggested transport of uranium out of the Granite Mountains during the Middle Precambrian thermal event to ascertain favourable sites for uranium exploration that may exist in nearby Precambrian rocks.
- (5) Experience in the Granite Mountains suggests that near-surface uranium content alone is an inadequate basis for judging igneous rock complexes as either potential source or host rocks. Many igneous complexes elsewhere in the world may have been prematurely dismissed on the basis of similar characteristics.
- (6) A study of the radioelement isotope systematics of granitic igneous complexes in Latin America may well be worthwhile. Selection of complexes for earliest study might be based on results of a preliminary study of uranium and thorium content. Wide variations in thorium-uranium ratios, particularly if the thorium content is above average for the rock type, may indicate uranium depletion.

## THE RESURGENT CAULDRON MODEL OF VOLCANIC URANIUM DEPOSITS

Recent increases in the market price of uranium have stimulated exploration for potential low-grade/large-volume uranium deposits in the USA. The volcanic calderas in the western USA, in which recent discoveries possibly of this type have been made, have attracted the interest of a number of explorationists. Earlier this year, a paper was prepared by a US Department of Energy (USDOE) geologist, F.G. Files, of the Grand Junction (Colorado) Office. It is essentially a summary of the pertinent literature on the caldera environment as applied to uranium favourability [8]. Material will be presented that has been excerpted almost entirely from Files' paper.

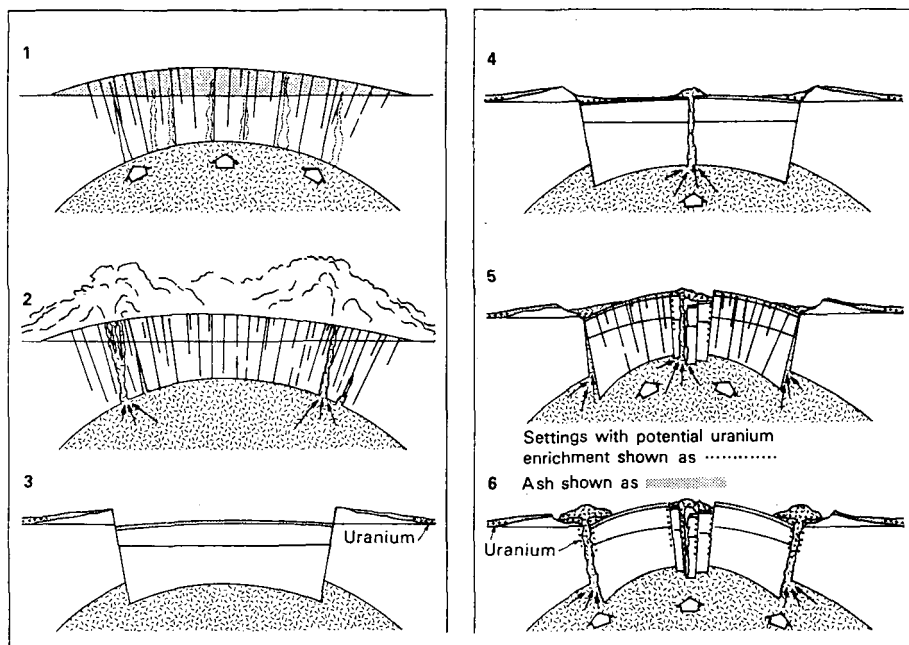


FIG.3. Stages in the resurgent cauldron cycle based on the Valles caldera. 1. Regional tumescence and generation of ring fractures; 2. Caldera-forming eruptions; 3. Caldera collapse; 4. Pre-resurgence volcanism and sedimentation; 5. Resurgent doming; 6. Major ring-fracture volcanism. Adapted from Smith and Bailey [9].

The basis for the model to be discussed is the resurgent cauldron cycle of Smith and Bailey [9] and the geochemical behaviour of uranium as a 'large ion lithophile' cation in differentiating magmas. The existence of enriched uranium in residual magmas and hydrothermal fluids resulting from magmatic differentiation provides the source of uranium for subsequent mineralization; the variety of geologic settings arising from the cauldron-forming process provide suitable loci for uranium deposition.

Figure 3, adapted from Smith and Bailey [9], depicts the first six stages of the resurgent cauldron cycle, based on detailed study of the Valles caldera in New Mexico, USA. The settings which may be favourable for uranium mineralization are indicated. The stages of the resurgent cauldron cycle, as depicted in Fig. 3, are: (1) regional doming over a magma chamber with formation of radial and ring fractures, (2) voluminous ash-flow eruptions from these fractures, (3) cauldron collapse in response to the magma withdrawal, (4) a short stage of pre-resurgence volcanism and sedimentation, (5) resurgent uplift and doming of the central cauldron block, (6) major ring-fracture volcanism. Volcanism during stage 6

frequently consists of eruption of rhyolite pyroclastic cones, domes, and flows in the moat zone, but may be sufficiently intense to result in stage 2 ash-flow eruptions, thus renewing the resurgent cauldron cycle.

Presumably, resurgent cauldrons may be considered generally more favourable localities for uranium exploration than cauldrons which collapsed without subsequent resurgence. Resurgent cauldrons are characteristic of the most silicic volcanic centres and give rise to the most highly differentiated magmas, which are generally those most significantly enriched in uranium. Also, resurgent doming commonly reopens fractures which could provide access for late hydrothermal solutions that may deposit uranium.

As shown in Fig. 3, the system of ring fractures developed over the magma chamber is one of the settings potentially favourable for uranium mineralization, notably at intersections with radial fractures and particularly if these fractures cut reactive host rocks. The structural setting of the ring-fracture zone itself exists from stage 1 onward, but uranium mineralization by hydrothermal solutions apparently occurs very late in the resurgent cauldron cycle or may post-date volcanic activity completely.

The cauldron-forming eruptions of stage 2 are generally voluminous silicic ash flows which may themselves be significantly enriched in uranium content, to the order of 20 ppm  $U_3O_8$  in some Great Basin examples, and may comprise many tens of cubic kilometres of material. According to Giles [10]:

“Many, and perhaps most, large-volume ash-flow sheets which erupted from such centers are compositionally zoned, both chemically and mineralogically. In a typical zoned, multiple flow, simple cooling unit, the common zoning pattern is a progressive upward transition from basal crystal-poor rhyolite to overlying crystal-rich and more mafic quartz latite. Transitions may be abrupt, but they usually are gradational and systematic. The evidence strongly suggests that such sheets are more or less an inverted replica of a compositionally zoned parent magma, and are the products of continuous eruption and deposition from successively lower levels in the chamber. The magma at the apical portions of the chamber prior to eruption was a differentiated ‘cream’ rich in silica, alkalies, and volatiles.”

Following the collapse in stage 3, the cauldron often exists thereafter as a basin or depression. It may be occupied by a lake receiving sediments derived largely from previously ejected, possibly uraniferous volcanic material from which uranium might be quite readily leached and further concentrated under suitable physical-chemical conditions. Such intra-caldera fill may also have received direct contributions of uranium from the underlying magma chamber in the form of hydrothermal solutions escaping as hot springs and fumaroles along the ring fracture zone, or through fractures in the cauldron floor in stage 6 of the resurgent cauldron cycle.

Uraniferous volcanic material deposited outside the ring fracture zone in stage 2 eruptions and eroded and redeposited in adjacent basins may be receptive

to roll-forming processes or other mechanisms of uranium concentration. In the Great Basin, such adjacent basins commonly are at present occupied by playa lakes. This environment merits careful attention for its uranium potential, as large quantities of uranium in solution may have entered these basins as a result of devitrification of tuffaceous material. Even if no suitable physical-chemical trap for removing uranium from solution and concentrating it into economic ore bodies existed, some basins might contain economically recoverable concentrations of uranium in brines. Brines in Clayton Valley, Nevada, contain mineable quantities of lithium [11], which is another element frequently concentrated in felsic volcanic rocks, and there are significantly anomalous concentrations of uranium in brines from Searles Lake, California, and Winnemucca Lake, Nevada.

The role of zeolitization of tuffaceous rocks as a possible source of uranium and as a trapping mechanism for deposition of uranium appears to warrant further investigation. A zeolite-uranium relationship was important in the process of uranium mineralization at the Tono mine in Japan, described by Katayama and co-workers [12]. There, uranium occurs absorbed on a zeolite mineral of the heulandite-clinoptilolite group. The uranium-zeolite relationship is further documented by Dickinson [13] for uranium occurrences in south Texas, where both uranium and thorium are absorbed on the zeolite clinoptilolite. Goodell [14] has recently reported on his studies of the behaviour of uranium during the diagenesis of felsic volcanic piles. He demonstrates that the zeolitization of tuffaceous rocks is a viable mechanism for producing economic uranium deposits. It is well established that zeolites have developed in tuffaceous rocks at various localities in Nevada [15].

The zone immediately beneath the basal volcanic rocks from a felsic volcanic centre, which is frequently a major unconformity, potentially is an important setting for uranium mineralization. Groundwater may leach uranium from the overlying volcanic sequence and migrate into this zone where it may encounter a variety of chemical and structural traps.

Rhyolitic plugs and domes intruded into the ring-fracture zone and cauldron floor during stages 4 and 6 may be significantly enriched in uranium. Rytuba [16] reports a uranium concentration of 0.052% eU in opalite from such a rhyolite dome intruded into the ring-fracture zone of the McDermitt caldera. According to Smith and Bailey [9], resurgent domes characteristically are pervasively hydrothermally altered. Such resurgence-related rhyolitic intrusions may represent a uranium equivalent of 'porphyry copper' deposits.

Isolated uraniferous rhyolite plugs, not known to be related to a cauldron, have been drilled to moderate depths at several localities in the Great Basin, but reportedly did not vary significantly in uranium content to the depths drilled. Some of these plugs have been subjected to hydrothermal mineralization, particularly along their margins, which were sufficiently fractured to have permitted the escape of hydrothermal solutions. In some cases, such plugs may have intruded

a permeable uraniferous host rock and provided a thermal driving mechanism causing the remobilization of uraniferous groundwater, with consequent uranium concentration in available traps in the convecting groundwater system.

Breccia pipes that formed as a result of the escape of residual magmatic water exsolved from a cooling magma [17] may be favourable for uranium mineralization. Such residual fluids may be relatively enriched in metals such as uranium that are not compatible with the silicate phases crystallizing from the melt.

In addition to the initial magma composition, the timing of events in the structural and petrologic evolution of a particular volcanic centre *is all important* to the uranium ore-forming potential of that centre. To quote Steven and co-workers [18]:

“Nothing in the process of ash-flow eruption or related caldera subsidence leads inherently to hydrothermal activity and mineralization. Eruption and subsidence, rather, create favorable plumbing systems in areas of active magmatism; whether these systems are used by ore-forming solutions depends on the extent of later igneous activity and on continued structural disruption that keeps the systems open. Recurrent intrusions along structurally complex ring-fracture zones and adjacent areas seem to be the most common events closely associated with the youngest and perhaps most highly differentiated of ring-fracture intrusions. The related mineralization most commonly takes place in fractures extending outward from the caldera walls; and a zone several kilometers wide around the periphery of a mineralized caldera generally contains the most, the largest, and the highest grade deposits.”

As pointed out by Giles [10], early concentrations of metals near the roof of the magma chamber, which would no doubt include uranium, are bled off with the big ash-flow eruptions that ultimately lead to cauldron collapse. The high uranium content of some of these units in the Great Basin already has been mentioned. Quoting Giles [10]:

“If the timing of the various parameters was off, for one reason or another, a wide range of situations can develop. Centers having a predominance of ash flows, weak alteration, and little or no mineralization or alteration imply preserved structural continuity and the rather sudden dissipation of energy. Centers containing an abundance of lavas, widespread alteration, and locally intense mineralization suggest an intricate and early-developed fracture system and the widespread and continued leakage of volatiles. A continuum between these situations probably exists.”

Volcanic rocks with the highest uranium content for a particular volcanic centre generally can be shown to be related to eruptions which occurred following long periods of quiescence and are associated with the apical parts of the underlying magma chamber [19]. To get uranium enrichment late in the resurgent cauldron cycle would seem to require just such a long period of quiescence preceding



FIG.4. Index map of possible Great Basin calderas favourable for uranium.

resurgence, during which uranium concentrations would again build up during differentiation of the remaining magma. Alternatively, these concentrations could result from incursion of fresh batches of magma enriched in uranium. Otherwise, most of the uranium would probably have escaped with the earliest products of the volcanic centre.

As a fundamental consideration, anatectic magmas formed from sialic crustal material already somewhat enriched in uranium should possess greater potential

for initially high uranium concentrations than do subcrustal magmas. However, data of Noble and co-workers [20] suggest that some magmas apparently derived from sub-crustal areas under the Great Basin have also given rise to volcanic rocks containing significant concentrations of uranium.

Geological settings favourable for uranium mineralization suggested by the model include: collapse or resurgence-related fractures, which may cut a variety of rock types; both intra-caldera and extra-caldera ash flows and ash falls or sediments derived largely from ejected uraniferous volcanic material; traps associated with the unconformity at the base of the volcanic pile; rhyolite domes and plugs (frequently associated with resurgence); and breccia pipes. However, only a fraction of resurgent cauldrons may have undergone a structural history conducive to making them favourable sites for economic hydrothermal uranium deposits. Most have spewed forth their uranium content in the form of voluminous, mildly enriched, silicic ash flows and ash falls which would require the action of further concentrating mechanisms to bring about uranium concentrations of economic interest.

Numerous areas of the Great Basin have uranium occurrences, many of which are associated with a volcanic environment. Marysvale, Utah, was the largest producing district of several areas that have undergone mining. However, few uranium mines currently are active in the region. Four areas, all with known uranium occurrences, have been tentatively identified as possibly fitting the resurgent cauldron model; these are the McDermitt, Thomas and Fish Creek Mountains calderas, and calderas of the Marysvale volcanic field (Fig. 4). The McDermitt caldera is reported to be an excellent example of the model, but the other three areas, particularly the Fish Creek Mountains caldera, are described as less clearly of caldera origin.

Uranium explorationists in the USA have tentatively accepted the resurgent cauldron favourability model, and all four of these caldera areas are being explored by drilling. Preliminary results of the drilling are encouraging.

The resurgent cauldron model may be useful as an exploration tool in other volcanic areas of the world. It is recommended that Files' paper and some of the literature he has used as the basis for his paper be obtained and studied by those who have felsic volcanic regions in their country. In addition, investigators might find it useful to compare the concept of the resurgent cauldron model discussed here with the model of Poços de Caldas, Brazil, which will be discussed by R. Santos of NUCLEBRAS at this advisory group meeting.

## REFERENCES

- [1] ROSHOLT, J.N., BARTELS, A.J., Uranium thorium and lead systematics in the Granite Mountains, Wyoming, *Earth Planet. Sci. Letters* 7 (1969) 141.

- [2] STUCKLESS, J.C., VAN TRUMP, G., Jr., BUNKER, C.M., BUSH, C.A., HUNTER, W.C., LEWIS, N.F., Jr., Radiometric and Petrographic Results for Samples from Drill Holes GM-1 and GM-2, Granite Mountains, Wyoming, US Geological Survey, Open-File Rep. 76-842 (1976) 19.
- [3] PETERMAN, Z.E., HILDRETH, R.A., Geochronology and Reconnaissance Geology of the Precambrian of the Granite Mountains, Wyoming, US Geological Survey, Open-File Rep. 77-140 (1977) 86.
- [4] STUCKLESS, J.C., NKOMO, I.T., Uranium-lead isotope systematics in uraniferous alkali-rich granites from the Granite Mountains, Wyoming: implications for uranium source rocks, *Econ. Geol.* 73 (1978) 427.
- [5] MALAN, R.C., STERLING, D.A., A Geologic Study of Uranium Resources in Precambrian Rocks of the Western United States; Distribution of Uranium and Thorium in the Precambrian of the West-Central and Northwest United States, US Atomic Energy Commission, Open-File Rep. AEC-RD-11 (1970) 64.
- [6] ROGERS, J.J.W., ADAMS, J.A.S., "Uranium", *Handbook of Geochemistry* (WEDEPOHL, K.H., Ed.), Springer Verlag, Berlin (1969) 92-B.
- [7] BALAGNA, J., Delineation of flow channels in crystalline rock using radioactive tracers, *EOS* 57 (1976) 1016 (abstract only).
- [8] FILES, F.G., Uranium in Volcanic Environments in the Great Basin, US Department of Energy, Open-File Rep. GJBX-98 (78) (1975) 20.
- [9] SMITH, R.L., BAILEY, R.A., "Resurgent cauldrons", *Studies in Volcanology - A Memoir in Honour of Howel Williams* (COATS, R.R., HAY, R.L., ANDERSON, C.A., Eds), *Geol. Soc. Am., Mem.* 116 (1968) 613.
- [10] GILES, D.L., Mineralization related to solitic volcanic centers and terranes, *Geol. Soc. Am., Abs. with Programs* 1 5 (1969) 27.
- [11] VINE, J.D., Lithium in sediments and brines - how, why, and where to search, *J. Res. US Geological Survey* 3 (1975) 479.
- [12] KATAYAMA, N., KUBO, K., HIRONO, S., "Genesis of uranium deposits of the Tono mine, Japan", *Formation of Uranium Ore Deposits* (Proc. Symp. Athens, 1974), IAEA, Vienna (1974) 437.
- [13] DICKINSON, K.A., "Uranium, thorium, soil profiles, and source rocks in south Texas", *Uranium and Thorium Research and Resources Conf.*, US Geological Survey, Open File Rep. 75-595 (1975) 13 (abstract only).
- [14] GOODELL, P.C., "Uranium and the diagenesis of volcanic sediments", 1977 NURE Uranium Geology Symp., December 7-8, 1977, US Department of Energy, Open-File Rep. GJBX-12 (78) (1978) 151.
- [15] PAPKE, K.G., Erionite and other associated zeolites in Nevada, *Nevada Bur. of Mines and Geol. Bull.* 79 (1972) 32.
- [16] RYTUBA, J.J., Uranium content of tuffaceous sediments and opalite mercury deposits within the McDermitt caldera, Oregon-Nevada, *Geol. Soc. Am., Abs. with Programs* 9 4 (1977) 492.
- [17] NORTON, D.L., CATHLES, L.M., Breccia pipes - products of exsolved vapor from magmas, *Econ. Geol.* 68 (1973) 540.
- [18] STEVEN, T.A., LUEDKE, R.G., LIPMAN, P.W., Relation of mineralization to calderas in the San Juan volcanic field, southwestern Colorado, *J. Res. US Geological Survey* 2 (1974) 405.
- [19] MITTEMPERGER, M., "Exhalative-supergenic uranium mineralization in the Quaternary alkaline volcanic rocks of central Italy, Uranium Exploration Geology (Proc. Panel Vienna, 1970), IAEA, Vienna (1970) 177.

- [20] NOBLE, D.C., HEDGE, C.E., McKEE, E.H., KORRINGA, M.K., Reconnaissance study of the strontium isotopic composition of Cenozoic volcanic rocks in the northwestern Great Basin, *Geol. Soc. Am., Bull.* 84 (1973) 1393.
- [21] STUCKLESS, J.C., PETERMAN, Z.E., A summary of the geology, geochronology, and geochemistry of Archean rocks of the Granite Mountains, Wyoming, *Wyo. Geol. Assoc. Earth Sci. Bull.* 10 3 (1977) 3-20D.

## DISCUSSION

M. MARTIN: How can you deduce that uranium has been lixiviated from the biotites and not from the leuco granites? Experience in Europe shows that the uranium source areas would be mainly in leuco granites.

D.L. CURRY: The analyses from the two closely spaced core holes in the Granite Mountains do not show much difference in the original uranium content of biotite granite and the leucocratic granite, but do indicate greater depletion of uranium from the biotite granite. Biotite granite predominates at the surface. Some published studies have suggested that biotite has great permeability in some granites, compared with the other mineral components of granites; thus, biotite may have provided the pathway for solution migration within the biotite granite. The Granite Mountains studies of the USGS suggest the possibility that biotite granites elsewhere in the world may have a secular disequilibrium similar to that of the Granite Mountains.

P.D. TOENS: We do believe that the type of granite is not that important. What is of great importance are the mechanisms which precipitate the uranium after it has been leached.

D.L. CURRY: This is an important point with which I am in general agreement, as knowledge of the specific source of uranium in a uranium province may be largely academic. However, knowledge of uranium source rocks can be very useful in evaluating the favourability for uranium of unknown areas, as a factor in deciding which of the areas to explore for uranium.

R.M. CASTILLO: Can the lixiviation process of uranium in granite bodies substantially affect the element content in the upper part of the granitic bodies in such form that it is difficult to detect the element in surface samples ('chip samples')?

D.L. CURRY: As I understand it, the question is whether the leaching has removed so much uranium from the surface-exposed rocks that the detection of uranium in surface samples is difficult. The original uranium content of near-surface granite in the Granite Mountains seems to have been about 20 parts per million. Uranium is still detectable, but analyses now average about 4 to 6 parts per million, which is about 'normal' for 'average granites', according to published data. Given a few million more years of exposures, the granite might have been even further depleted of uranium.

P.M. BARRETTO: What would be the uranium profile from surface to depth? All these upper zones show the same leaching condition. Also, it seems that French investigators studying similar leaching phenomena in the San Silvestre granite discovered uranium loss down to 300 to 350 metres. Would this depth reflect the core availability or would you expect uranium loss to greater depths?

D.L. CURRY: Insufficient data have been acquired with which to construct a good profile. USGS published reports analyses of samples from the surface and two closely spaced holes (20 metres apart) to 410 and 475 metres of depth, plus minor additional shallow drill-hole data. As stated in my paper, the two deep holes showed depletion as deep as 390 metres. Although the final report has not been completed, it is my understanding that a drill hole, jointly drilled by the USDOE/USGS to about 680 metres, still did not positively reach rock that had no uranium depletion. This is deeper than I expected depletion to have taken place.

A.D. BELLUCO: As an extra comment on what Dr. Curry has said about the importance of studying areas of fertile uranium sources, may I add something about the occurrence in the Sierras Pampeanas (central Argentina), a zone with a geological table that combines a source with labile uranium composed of a Devonian granite (Sierra de Los Gigantes) and a favourable reception area with continental fluvial Tertiary sandstones (Eocene). At both extremes there have been deposits of epigenetic uranium with vein models and dispersion masses in the granites, probably of the calcrete type in the Tertiary sediments. In all cases the minerals are of the yellow uranium variety 'vanadates and phosphates'. This shows once again the special importance of studying the probable uranium-fertile areas in a country or territory, not only to determine the source areas in other geological environments but also to arrive at a general picture of the local epigenetic sources of economic interest.

# TECNICAS AEREAS, DE TERRENO Y DE SONDEO PARA LA EXPLORACION DE URANIO

J.G. BAIRD, J.L. SEARA  
Scintrex Ltd.,  
Concord, Ontario,  
Canadá

## Abstract-Resumen

### AERIAL, LAND-BASED AND DRILLING TECHNIQUES FOR URANIUM EXPLORATION.

Radiometric methods of uranium prospecting have acquired great importance on account of the high demand for uranium as power reactor fuel and the possibility of their use for geological and structural studies. The concentration of uranium in the deposits is generally of the order of 0.1% or less. Such a low concentration may go undetected by the geologist's magnifying glass when examining the samples. Fortunately, uranium and its decay products emit gamma rays which can be detected by special instruments. Described here, for the benefit of the field geologist using such instruments, are the basic concepts and applications of the different types of instrumentation for the detection and analysis of potassium, uranium and thorium concentrations from aircraft, vehicles and boats, by borehole logging and in outcrops and laboratory samples.

### TECNICAS AEREAS, DE TERRENO Y DE SONDEO PARA LA EXPLORACION DE URANIO.

Los métodos radiométricos de prospección del uranio han adquirido gran importancia debido a la gran demanda de uranio como combustible de reactores de potencia y a la posibilidad de utilizarlos para investigaciones geológicas y estructurales. La concentración del uranio en los yacimientos uraníferos es, en general, del orden de 0,1% o menor. Este tipo de concentración tan baja puede ser que pase inadvertido a la inspección de las rocas con lupa, hecha por el geólogo al examinar las muestras. Afortunadamente el uranio y sus productos de desintegración emiten rayos gamma que pueden detectarse por medio de instrumentos especiales. El propósito de esta memoria es el de describir, para el geólogo de campo que utiliza esos instrumentos, las ideas básicas y aplicaciones de los diferentes tipos de instrumentación para detectar y analizar concentraciones de potasio, uranio y torio por medio de avión, vehículo, lancha, en sondeos, en afloramientos y en laboratorio.

## 1. RADIACION GAMMA

Los núcleos de los elementos radiactivos se desintegran espontáneamente emitiendo partículas alfa (núcleos de helio), partículas beta (electrones y positrones) y rayos gamma (radiación electromagnética). Las partículas alfa y beta pierden su energía al pasar a través de materia debido a que poseen masa y carga haciendo que la penetración en el terreno sea de unos milímetros, lo que impide su utilización para prospección radiométrica. Por el contrario, los rayos gamma como no poseen carga o masa y su longitud de onda es muy corta, su penetración es mucho mayor,

siendo capaces de atravesar varias decenas de centímetros de roca. Cada rayo gamma tiene una energía característica del elemento, cuya medida es mega-electrón-voltio (MeV). Un MeV es la energía necesaria para mover un electrón a través de una diferencia de potencial de un millón de voltios.

Aparte del isótopo de potasio (K-40), casi todos los elementos con radiactividad natural forman parte de alguna de las series radiactivas que proceden del uranio o torio (elementos primarios) que se desintegran espontáneamente transformándose en otros elementos (secundarios) a su vez radiactivos. Si el número de núcleos (secundarios) se vuelve a desintegrar y además este número se mantiene constante por unidad de tiempo, se dice que existe un "estado de equilibrio" radiactivo. Si uno o más núcleos secundarios o primarios desaparecen de las correspondientes series se dice que existe un estado de desequilibrio. Por ejemplo, el radón-222 es un gas con gran movilidad que puede escaparse a la atmósfera, el uranio-234 y el radio-226 son solubles en agua y puede ser que sean disueltos por aguas superficiales; siempre que exista equilibrio radiactivo, la radiación gamma medida con el espectrómetro es indicativa de las concentraciones de potasio, uranio y torio.

Los rayos gamma son afectados de varias formas diferentes en sus interacciones con los átomos. La energía de los rayos gamma puede transferirse a un electrón de cierto átomo arrancándolo de su órbita (este fenómeno es conocido como "efecto fotoeléctrico") y en el proceso de deceleración este electrón puede ionizar otros átomos en un cristal de NaI(Tl) produciendo luz (destello). Otras veces los rayos gamma pueden penetrar en el átomo y ser completamente absorbidos, produciendo un par electrón-positrón (fenómeno conocido como "producción de pares").

Finalmente, los rayos gamma de alta energía pueden producir rayos gamma de energía más baja después de colisionar con un electrón (fenómeno conocido como "efecto de Compton"). Esos tipos de interacciones son importantes para el geólogo prospector de uranio, sobre todo el efecto de Compton.

## 2. ESCINTILOMETROS Y ESPECTROMETROS

Los instrumentos más modernos para detectar radiación natural emplean un cristal de yoduro sodio enriquecido con talio, INa(Tl), colocado enfrente de un fotomultiplicador. Cuando un rayo gamma atraviesa el cristal, produce destellos cuya intensidad depende de la energía del rayo gamma. El fotomultiplicador convierte los destellos en pulsos de corriente que son amplificados; la altura de estos pulsos así amplificados es proporcional a la energía del rayo gamma detectado.

Los instrumentos más comunes para la prospección del uranio son los escintilómetros. En éstos los pulsos son procesados por un circuito eléctrico llamado escalímetro cuya salida se da en segundos.

Otros instrumentos más sofisticados son los espectrómetros, que son capaces de medir la altura de cada pulso por medio de un circuito llamado "anализador de altura de pulsos" y de distinguir rayos gamma de diferentes energías. Hay dos tipos de espectrómetros conocidos con el nombre de umbral o integral y diferencial. Los espectrómetros integrales aceptan pulsos cuya altura sobrepasa cierto límite preseleccionado, por lo tanto permiten medir rayos gamma cuya energía es mayor de un cierto valor. Los espectrómetros diferenciales aceptan pulsos cuya altura está comprendida entre dos valores preseleccionados, uno mínimo y otro máximo; esto permite medir rayos gamma cuya energía está situada dentro de cierta ventana o banda.

Los análisis de muestras radiactivas se llevan a cabo dibujando el espectro de energías. Esto puede hacerse usando, por ejemplo, una ventana de anchura 0,03 MeV y moviendo sucesivamente la ventana a incrementos de 0,03 MeV para cada lectura.

En la Fig.1 se presentan los espectros de energía para el potasio, uranio y torio obtenidos con un cristal de 1,3 ltr de volumen. En dicha figura el potasio-40 contiene un pico con energía de 1461 MeV. La contribución en las energías fuera de este pico de 1461 MeV se debe al efecto de Compton.

El espectro de la pechblenda es mucho más complicado que el del potasio, debido a la gran variedad de rayos gamma de diferentes energías procedente de los productos secundarios de la serie radiactiva de uranio. El pico característico es el del bismuto-214 con energía de 1764 MeV que es usado en análisis radiométrico de uranio. El espectro del torio es también complicado y el pico característico es el talio-208 con energía de 2614 MeV.

El examen de la Fig.1 nos revela la posición de las ventanas usadas para medir las cuentas del K, U, y Th en los espectrómetros de cuatro canales. El cuarto canal es la cuenta total que correspondería a una ventana que barre todas las energías del espectro. También se deduce de esa figura que la presencia de potasio en las rocas no interfiere con las medidas hechas en las ventanas del uranio o torio; sin embargo, la presencia de uranio y torio causará aumento de cuentas en la ventana del potasio, y la presencia de uranio en las rocas producirá una interferencia depreciable en la ventana del torio; pero si el torio está presente causará cierto aumento en las cuentas en la ventana del uranio. Debido a estas razones, los análisis radiométricos deben corregirse de estas interferencias; este proceso se llama corrección debida al efecto de Compton. En algunos espectrómetros comerciales de cuatro canales, los coeficientes de corrección (una vez conocidos) pueden ajustarse en el instrumento. Estos coeficientes pueden calcularse calibrando el instrumento en lugares de concentraciones de K, U y Th conocidas.

Otro factor importante a considerar en los espectrómetros de cuatro canales es la deriva de los picos de K, U, y Th, debido principalmente a la deriva del sensor (cristal y tubo fotomultiplicador) con cambios de temperatura. Este problema se soluciona por medio de una muestra radiactiva insertada periódicamente cerca

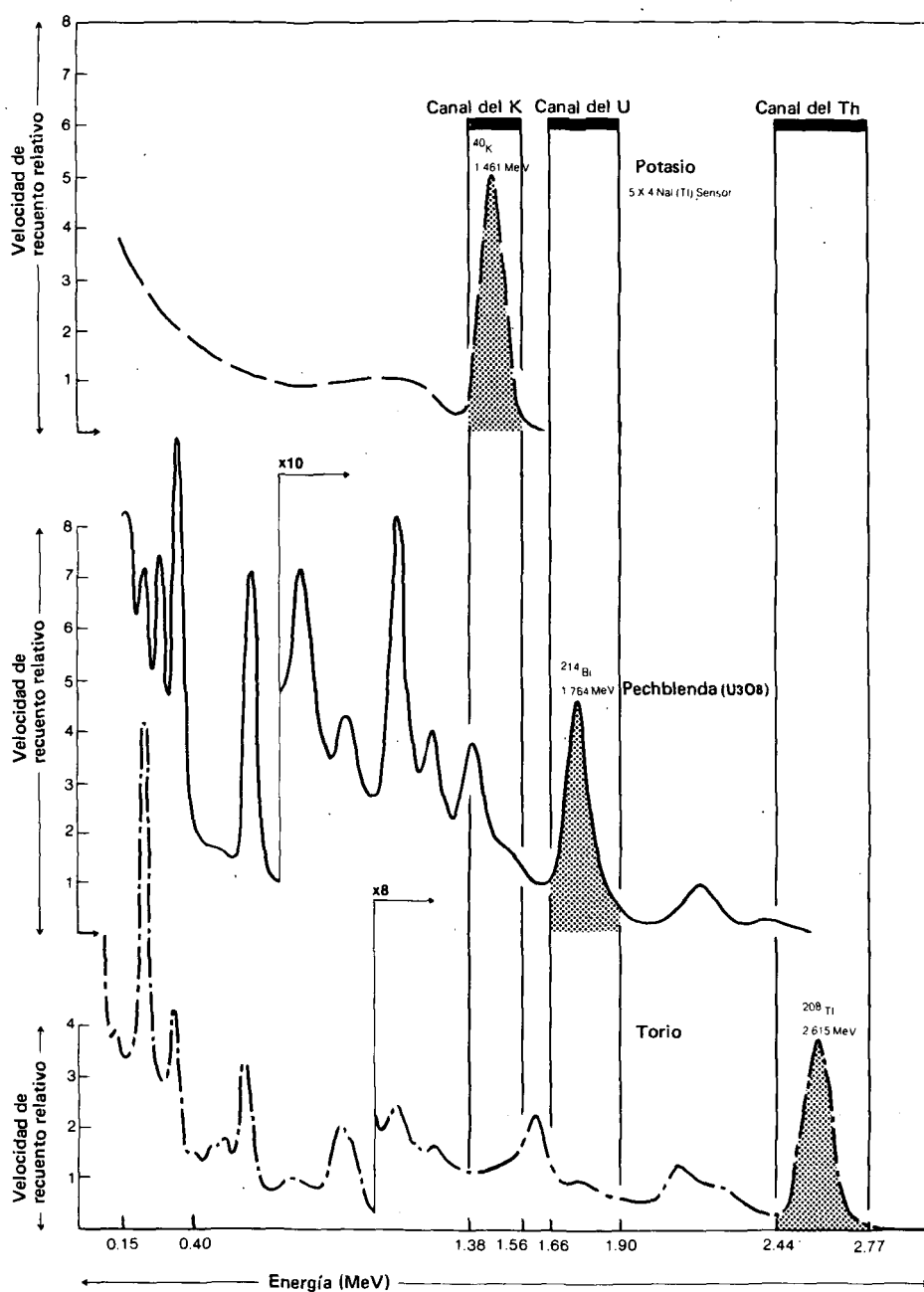


FIG.1. Espectro diferencial de energías de rayos gamma.

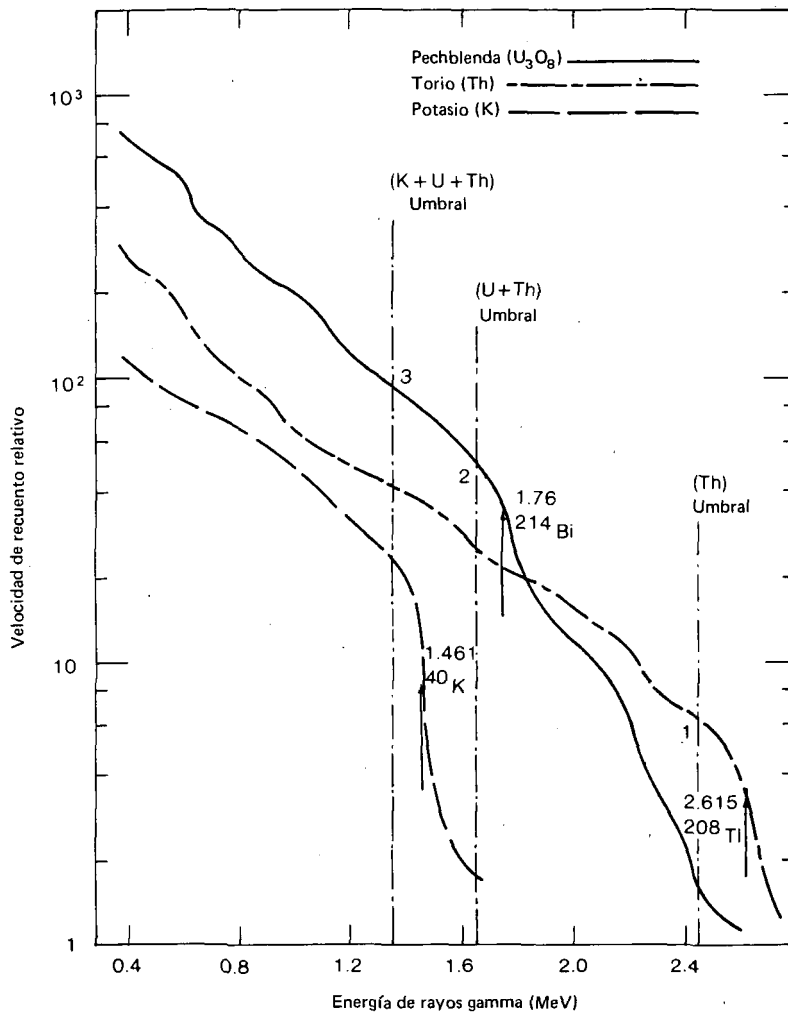


FIG.2. Espectro integral de energías de rayos gamma.

del cristal que produce rayos gamma de cierta energía. La posición de este pico de energía se controla por un circuito electrónico que hace variar automáticamente el control de ganancia del fotomultiplicador haciendo que las ventanas de K, U y Th permanezcan en una posición fija. Los espectrómetros con un tal sistema de corrección de deriva se llaman "estabilidades".

En la Fig.2 se representa el espectro integral para el potasio, uranio y torio. Este tipo de espectro se puede obtener integrando (por ejemplo, calculando el área bajo las curvas entre un cierto valor de la abscisa variable, y un valor alto de

la abscisa, digamos 5 MeV) las curvas espectrales dadas en la Fig.1. Contrariamente, si se obtiene la diferencial de las curvas en la Fig.2, se obtendrán las curvas en la Fig.1. Esta es la razón por la cual se usa la nomenclatura de espectrómetros integrales y diferenciales.

### 3. EXPLORACIONES EN CAMPO

Las exploraciones de reconocimiento en el campo pueden llevarse a cabo usando un escintilómetro provisto de una alarma variable que funciona cuando la radiación gamma sobrepasa un valor preseleccionado de la radiación de fondo; este tipo de instrumento se puede colocar en la mochila del prospector o geólogo dejándole las manos libres para hacer los trabajos de cartografía y geología.

Una vez que las áreas de afloramiento hayan sido localizadas, el análisis de concentraciones radiactivas puede llevarse a cabo usando un espectrómetro integral o diferencial, cuya sensibilidad puede ser del orden de 50 ppm (0,005%) para el uranio y torio y del orden del 1% para el potasio.

La movilidad y solubilidad de algunos de los isótopos de las series de uranio pueden jugar un papel de gran importancia en la exploración radiactiva, especialmente en depósitos profundos, y puede ser que algunos de los materiales radiactivos disueltos se localicen en las cercanías del yacimiento.

### 4. EXPLORACIONES AUTOTRANSPORTADAS

En el caso de que el terreno no sea muy accidentado y que se disponga de suficientes carreteras o caminos, puede ser conveniente utilizar un sistema autotransportado. Las ventajas de la exploración autotransportada son: a) Pueden usarse cristales de mayor volumen (2 a 8 litros) mejorando los datos estadísticos e incrementando la sensibilidad; b) solamente la cuenta total, o mejor, cuenta total y potasio, uranio y torio pueden registrarse analógicamente o digitalmente; c) se puede adaptar un sistema de marcas fiduciales a la registradora de forma que éstas sean marcadas al azar, o a tiempos o distancias iguales, o hacer que la velocidad de la registradora sea proporcional a la velocidad del vehículo — esta operación hace que las anomalías sean perfectamente localizadas en el mapa topográfico; d) se pueden instalar alarmas sonoras o visuales en el vehículo para llamar la atención del operador cuando las cuentas sobrepasen un valor prefijado; e) finalmente, el vehículo puede equiparse con otro tipo de instrumento, como un magnetómetro o un pequeño laboratorio geoquímico.

El sensor conteniendo el cristal de NaI (Tl) puede instalarse en la parte superior del vehículo o en la parte inferior; en este último caso debe tenerse cuidado de no colocarlo encima del tanque de gasolina pues se producirá una atenuación de

los rayos gamma. Otro factor a tomar en consideración es la atenuación debida a carreteras asfaltadas.

La exploración debe hacerse cerca de una red de carreteras o caminos, siguiendo transversales preseleccionadas, y los instrumentos se deben calibrar frecuentemente por medio de muestras radiactivas.

## 5. EXPLORACIONES AEROTRANSPORTADAS

### 5.1. Llevamientos de reconocimiento

El factor más importante para determinar las características de una exploración radiométrica aérea es posiblemente la cuestión de beneficios con respecto a los costos de exploración. En el caso de exploraciones para uranio, los costos pueden ser reducidos al máximo utilizando el canal de cuenta total. Este tipo de equipo puede ser instalado en avión o helicóptero sin tener que hacer ninguna modificación en lo referente al montaje. Las exploraciones pueden llevarse a cabo siguiendo líneas de vuelo paralelas o siguiendo líneas de igual elevación topográfica, o volando sobre estructuras geológicas preseleccionadas. Cuando se descubre una anomalía en la cuenta total, el geólogo o geofísico sugiere al piloto que vuele de nuevo la línea usando el canal de uranio o, en el caso de disponer de un helicóptero, que aterrice para hacer un análisis radiométrico de las rocas de superficie.

### 5.2. Llevamientos sistemáticos de prospección

A veces, las exploraciones radiométricas aerotransportadas se llevan a cabo usando un espectrómetro de cuatro canales, obteniendo lecturas en las bandas de torio, uranio, potasio y cuenta total. La salida puede ser digital o analógica. Es importante el considerar el concepto de tiempo de integración, que es el tiempo en el cual se cuentan los pulsos debidos a los rayos gamma antes de transferirlos a la registradora. Entre los posibles accesorios necesarios para una exploración aerotransportada pueden considerarse los siguientes:

- a) Cámara fotográfica de 16 o 35 mm para reconstrucción de líneas de vuelo.
- b) Radialtímetro para efectuar la corrección de altitud.
- c) Intervalómetro que correlaciona la cámara fotográfica con las fiduciales de la graficadora (analógica o digital).
- d) Sistema de intercomunicación (Intercom) que establece comunicación entre el piloto y los operadores.
- e) Instrumentos accesorios como magnetómetro, sistema electromagnético, etc.

Se pueden usar espectrómetros de cuatro canales para localizar anomalías puntuales como las debidas a afloraciones de menos uranio; el volumen de cristal de NaI(Tl) suele ser de 7 a 17 litros.

El tipo de avión o helicóptero, así como la altura de vuelo y la densidad de las líneas se deben seleccionar en función de la topografía, geología y rumbo de los posibles afloramientos. A veces es conveniente volar paralelamente al rumbo de los afloramientos ya que se incrementa la posibilidad de obtener datos más significativos debido a que el tiempo de integración suele ser de 1 segundo en la mayoría de los sistemas aéreos.

Los datos se pueden presentar en mapas que presentan las líneas de vuelo con indicaciones puntuales de las anomalías, o en mapas de contorno, o en perfiles apilados correspondientes a la cuenta total, uranio y torio. A veces, el cociente de cuentas U/Th, U/K y Th/K se representa en gráficos, reduciendo así parcialmente los errores debidos al efecto de Compton.

### 5.3. Llevamientos regionales

Los programas de exploración regional suelen llevarse a cabo con sensores de volumen más grande (30 ó 50 litros) y la separación de las líneas de vuelo puede llegar a ser de 4 ó 5 km. En este caso se usan espectrómetros multicanales que pueden grabar digitalmente hasta cerca de 250 canales del espectro de energía, lo que, por supuesto, incrementa el costo del proceso y análisis.

En ambos casos los cristales de NaI (Tl) deben ser termocontrolados, y la estabilización es mandatoria. Debido a que la energía de los rayos gamma decrece con la altitud, la altura de vuelo debe ser entre 100 y 120 m, y además se deben corregir las variaciones topográficas usando las correspondientes fórmulas de atenuación.

El radón-222 procedente del terreno puede escapar a la atmósfera y en el caso de encontrar una inversión de temperatura se acumulará a cierta altura; este elemento después de emitir dos partículas alfa y una partícula beta se convierte en bismuto-214 que emite rayos gamma. El cristal instalado en el avión verá esta acumulación de radón como una anomalía.

En el caso de que el avión vuele por bajo de la inversión, se pueden efectuar correcciones usando un cristal rodeado de una cubierta de plomo excepto en la parte superior, de forma que se detecte la radiación procedente de alturas inferiores a la de vuelo.

Las correcciones debidas a radiación de fondo deben ser determinadas al principio y al final del vuelo, y las correcciones debidas al efecto de Compton deben efectuarse volando sobre áreas de concentraciones conocidas.

Debido a que los datos se registran digitalmente, el proceso y las correcciones tienen que hacerse por medio de una computadora. Con los datos corregidos puede obtenerse además la siguiente información:

- a) Identificar variaciones debido a composición geoquímica de tipos de rocas.
- b) Determinar el espectro de energías para cada unidad geológica.
- c) Producir histogramas de frecuencia para cada unidad geológica.
- d) Producir tablas indicando el tipo de distribución para cada unidad de rocas debido a cada variable radiométrica.
- e) Producir mapas de contorno con los datos radiométricos corregidos.

Además de la registradora digital multicanal, debe hacerse cierto control del propio funcionamiento del sistema usando registradoras analógicas de seis u ocho canales.

El costo de estas exploraciones es realmente más alto debido al análisis obligatorio de los datos a través de la computadora y, además, a la necesidad de usar grandes volúmenes de cristal, lo que repercute en la necesidad de usar aviones o helicópteros más pesados. Esto complica también la logística de la exploración.

## 6. SONDEOS RADIOMETRICOS

Los sondeos o testificaciones radiométricas se llevan a cabo usando una sonda o sensor, un "winch", un espectrómetro y una graficadora.

Dependiendo de la profundidad a alcanzar, el "winch" puede ser movido por un motor, lo que permite variar la velocidad de la sonda. Para controlar la profundidad de la sonda, el "winch" se adapta con un odómetro. Se pueden utilizar espectrómetros de uno o cuatro canales; en el primer caso se usaría una registradora de un canal y en el segundo una de cuatro canales.

Los sistemas de sondeo se utilizan de dos formas: a) Trabajo cualitativo para estudios litológicos, para determinación de la zona metalizada y para la identificación mineral; b) Trabajo cuantitativo para calcular la concentración de las menas metalizadas.

Además de la registradora analógica, algunas compañías ofrecen registradoras digitales tipo cassette para proceso de datos por medio de computadoras o registradoras que imprimen los datos en una cinta de papel produciendo además una representación gráfica y listado.

Debido al incremento de temperatura con la profundidad, las variaciones en la ganancia del fotomultiplicador son apreciables. A profundidades de 300 metros, las variaciones de temperatura y de cuentas entre zonas metalizadas con uranio y torio y zonas no metalizadas pueden producir hasta un 10% de cambio en la ganancia, lo que se traduce en errores del 50% en concentraciones. Aunque en estudios cualitativos estos errores pueden ser aceptables, en estudios cuantitativos el espectrómetro debe tener un sistema de estabilización.

Normalmente los cuatro canales, total, K, U, Th se registran simultáneamente. Si se registra solo un canal, debe tenerse en cuenta que la cuenta total es útil solamente en casos donde el torio no esté presente o cuando los cocientes de U/Th sean constantes.

## 7. TECNICAS DE LABORATORIO

Además del análisis de las muestras efectuado en el campo con un espectrómetro integral o diferencial, se suelen analizar algunas de las muestras de superficie o testigos del sondeo en el laboratorio.

Se pueden analizar los testigos fabricando una estructura cerrada de plomo donde se colocan éstos manteniendo siempre la misma geometría con respecto al sensor.

La muestra de superficie se puede triturar y poner en un envase cuidadosamente sellado para evitar la contaminación radiactiva de los instrumentos, y se procede de la misma forma mencionada anteriormente.

El espectro de energías se obtiene utilizando tiempos suficientemente largos de cuenta. De este modo se alcanza una precisión superior al 5%. Los valores no coincidirán necesariamente con los obtenidos en el campo debido a que el proceso de trituración deja escapar el radón contenido en la muestra. Si este es el caso, se deben sellar las muestras rápidamente después de trituración y hacer el análisis al cabo de varios días. Para calcular las concentraciones de potasio, uranio y torio se efectúa previamente el análisis espectral del envase lleno de concentraciones ya conocidas de estos elementos; de esta forma la comparación de los espectros nos dará el valor relativo de las concentraciones.

### 7.1. Aplicaciones especiales

En regiones donde hay muchos lagos o en áreas donde el afloramiento está situado cerca de un lago o río, a veces es conveniente seguir el afloramiento bajo la cubierta de agua, debido a que los rayos gamma son completamente absorbidos por menos de un metro de agua. Las exploraciones radiométricas en estos casos se hacen remolcando una bolsa alargada con contrapesos, de forma que se mantenga contacto con el fondo del lago.

En ella se pone el cristal con el fotomultiplicador y también un sistema de electrodos para medir la resistividad de las rocas de fondo.

El espectrómetro y la registradora van montados en la lancha. Normalmente se miden los cuatro canales radiactivos y la resistividad; esta última detecta áreas de cubierta sedimentaria y áreas de afloramiento que pueden ser acompañadas de anomalías radiométricas.

Para las regiones de topografía plana y cubiertas de nieve de poco espesor se han ideado sistemas montados en vehículos de nieve para los que no representa ningún problema arrastrar un sensor de gran volumen. El procedimiento de exploración es similar al descrito en los sistemas autotransportados.

## 8. CONCLUSION

Se han tratado los métodos básicos generales de exploración radiactiva, abordando brevemente las formas diferentes de llevar a cabo las exploraciones, sin entrar en los detalles específicos de cada técnica. Desafortunadamente, la literatura española carece de abundantes textos o artículos que traten de este tema, así como de terminología adecuada válida en todos los países de habla hispana. Es de desear que en un futuro próximo este problema se vea solucionado.

## DISCUSSION

J. TAYLOR: In lake bottom radiometric surveys could you indicate what you are actually trying to measure, that is, particulated transported uraniferous material or uranium recently deposited from solution?

J.G. BAIRD: One would hope to detect gamma radiation from uranium or any daughter product which might occur in the lake bottom sediments, underwater outcrops or boulders. Your point is well taken in that I suspect you are referring to the disequilibrium problem of uranium in sediments. The fact is that with a lake bottom logger, such as the one described, both detectability and analysis of uranium could be quite limited. However, favourable geology does not stop at the shores of lakes and this system is a rather cost effective approach to underwater exploration.



# TECNICAS DE EXPLORACION DE URANIO EMPLEADAS EN BOLIVIA

V. VIRREIRA

Comisión Boliviana de Energía Nuclear (COBOEN),  
La Paz, Bolivia

## Abstract-Resumen

### URANIUM EXPLORATION TECHNIQUES IN BOLIVIA.

The exploration techniques used by the Bolivian Nuclear Energy Commission/Comisión Boliviana de Energía Nuclear (COBOEN) in certain areas of Bolivia that are considered promising from the standpoint of uranium deposits are presented in summary form. The methods and results obtained are described, including the techniques used by the Italian company AGIP-URANIUM during four years of exploration under contract with COBOEN. Statistical data are also given explaining the present level of uranium exploration in Bolivia.

### TECNICAS DE EXPLORACION DE URANIO EMPLEADAS EN BOLIVIA.

La presente contribución muestra en forma resumida las técnicas de exploración empleadas por la Comisión Boliviana de Energía Nuclear (COBOEN) en algunas áreas del país definidas como potenciales para la localización de yacimientos uraníferos. Se presenta una descripción de los métodos, así como los resultados obtenidos incluyendo las técnicas aplicadas por la compañía italiana AGIP-URANIUM, en cuatro años de exploración como contratista de la COBOEN. Asimismo, se muestran datos estadísticos que permiten explicar el nivel actual de la exploración de uranio en Bolivia.

## 1. INTRODUCCION

Bolivia, país tradicionalmente minero, con una extensión de aproximadamente 1 100 000 km<sup>2</sup>, está realizando en esta última década proyectos de exploración de minerales radiactivos y especialmente de uranio, a través de la Comisión Boliviana de Energía Nuclear (COBOEN).

Esta institución también está autorizada por el Estado a suscribir contratos de operaciones uraníferas, sean de servicio (contratos de explotación) o de asociación, con empresas privadas nacionales o extranjeras, que abarcan desde la exploración hasta la producción de concentrados.

La prospección de uranio en Bolivia, cuya intensidad está en relación con los requerimientos energéticos actuales del país, está siendo financiada por el Tesoro General de la Nación, además del apoyo del Organismo Internacional de Energía Atómica con su Programa Regular de Asistencia Técnica y un contrato de servicios con la compañía italiana AGIP-URANIUM.

Teniendo en cuenta que las condiciones geológicas aptas para la búsqueda de uranio se encuentran en más de 700 000 km<sup>2</sup> del territorio nacional, sólo se ha explorado alrededor de un 10% de estas áreas potenciales, restando así una extensión considerable para proyectos futuros que deberán ser llevados a cabo en los próximos años.

Las principales técnicas de exploración empleadas por la COBOEN son:

- prospección aérea en avionetas y helicópteros;
- prospección terrestre,
  - radiometría,
  - “track etch”,
  - emanometría,
  - geoquímica de suelos y aluviones,
  - perforaciones a diamantina.

Por otra parte, es importante señalar que la COBOEN cuenta en la actualidad con un servicio de laboratorios especializados, que apoyan eficientemente todas las actividades de exploración.

El personal encargado de la ejecución de los proyectos está compuesto por: 7 ingenieros geólogos, 1 ingeniero de minas, 3 metalurgistas, 8 prospectores y 5 técnicos químicos, que forman el Departamento de Materias Primas Radiactivas de la COBOEN. Ocasionalmente, se cuenta con la cooperación de expertos del Organismo Internacional de Energía Atómica, y el contrato de servicios con AGIP-URANIUM facilita un personal propio compuesto por técnicos nacionales y extranjeros.

Los resultados alcanzados hasta la fecha pueden considerarse en general positivos, teniendo en cuenta los recursos de que se dispone, las dificultades del relieve, así como el poco desarrollo de la infraestructura necesaria para este tipo de operaciones.

## 2. ACTIVIDADES DE EXPLORACION

El inicio de las actividades de exploración de uranio en Bolivia se produjo a principios de la presente década. Al principio se orientaron esas actividades hacia una correlación de algunas formaciones del sistema crétácico en base al yacimiento uranfíero de Don Otto, localizado en el norte de Argentina.

Posteriormente se tomó como base de la planificación el “Levantamiento Mineralógico Piloto de la Cordillera”, trabajo realizado por la compañía sueca Swedish Consulting en 1963, sobre 15,000 km<sup>2</sup>. Este levantamiento geofísico integrado incluye con especial atención la magnetometría y electromagnetismo aéreos. Ya en esta época se había intentado el uso de un espectrómetro como complemento del levantamiento; lamentablemente y por razones desconocidas el uso de este método fue interrumpido en su normal secuencia de aplicación.

Sin embargo, los datos radiométricos comunicados, aun siendo incompletos han permitido a COBOEN conducir sus proyectos de prospección de uranio a la Cordillera de los Frailes, formada por un complejo de rocas volcánicas que se compone principalmente de lavas, ignimbritas y tobas de naturaleza riolítica y riodacítica, de edad mio-plioceno, y penetrada por cuerpos dácíticos más recientes. En este ambiente se localizaron varias áreas de interés, que se están explorando actualmente aplicando varios métodos. Debemos mencionar también que en estas formaciones volcánicas se encuentra la mina uranífera de Cotaje, descubierta por COBOEN en 1970.

La ampliación de los programas de prospección ha permitido encontrar muchos indicios uraníferos en otros tipos de ambientes geológicos, como en cuencas sedimentarias continentales y hasta en formaciones marinas asociadas probablemente a fuentes hidrotermales o de naturaleza mixta.

Se concentraron los esfuerzos en parte de las formaciones terciarias del Altiplano y la faja subandina en su parte meridional, especialmente por las condiciones de deposición, por la presencia de materia orgánica y por la naturaleza de los sedimentos.

Asimismo, el conocimiento de las provincias metalogenéticas de mineralización tradicional en el país, y sus posibles asociaciones con eventuales yacimientos de uranio, han permitido seleccionar algunas áreas en el borde oeste de la Cordillera Oriental, habiéndose encontrado varios indicios radiométricos que serán desarrollados en el futuro.

Otra forma de localización de áreas de interés ha sido la constante verificación radiométrica de las entregas de mineral, en los diferentes centros de almacenamiento del país.

### 3. PROSPECCION AEREA

Entre los años 1974 y 1978 se han hecho aproximadamente 36 000 km<sup>2</sup> de prospección aérea sistemática.

El contrato de servicios con AGIP-URANIUM ha permitido efectuar 24 000 km lineales de espectrometría gamma y magnetometría en avioneta y 32 800 km lineales en helicóptero.

En el primer caso se utilizó un "sensor" con un volumen de cristal aproximado de 900 pulg.<sup>3</sup>, acoplado a un sistema completo de prospección, es decir: espectrómetro estabilizador, cámara fotográfica de posición, radar, magnetómetro de protones para intensidad de campo total y un sistema de navegación automático (Dopler), todo ello instalado en una avioneta Piper bimotor. El espaciado de líneas fue de 1 km, y 500 pies la altura de vuelo.

En la prospección mediante helicóptero se utilizaron en general los mismos equipos radiométricos con la diferencia de un volumen de cristal menor (450 pulg.<sup>3</sup>)

y prescindiendo del sistema de navegación así como del magnetómetro. En este caso se utilizó un helicóptero "Lama" de fabricación francesa, y el espaciamento de líneas fue de 500 m con una altura de vuelo de aproximadamente 300 pies.

En ambos casos los resultados mostraron muchas anomalías uraníferas. Sin embargo, dada la naturaleza del relieve y la topografía abrupta en la mayoría de las áreas sobrevoladas, podemos indicar que la prospección en helicóptero es la más conveniente, a pesar de su alto costo.

Los parámetros que más negativamente parecen influir en la prospección con ala fija en la faja andina son: la velocidad y la altura de operación.

Acaba de terminarse otro proyecto de prospección sistemática en helicóptero, llevado a cabo por COBOEN en un área de 5 200 km<sup>2</sup> de la Cordillera de los Frailes. En este caso el levantamiento fue realizado con un contador general de salida analógica, cuyo volumen de cristal es de 230 pulg.<sup>3</sup>

En todos los casos el material de vuelo empleado consistió en mosaicos topográficos de esc. 1:50 000 y fotografías aéreas verticales de esc. 1:40 000.

#### 4. PROSPECCION TERRESTRE

Las técnicas utilizadas en esta fase son las siguientes:

##### 4.1. Radiometría

Hasta ahora este método es el de mayor aplicación, considerando las etapas convencionales en los niveles de reconocimiento, de prospección sistemática y de prospección detallada. Obviamente, es el procedimiento de exploración más eficaz.

##### 4.2. "Track etch"

Dados las características de algunas zonas de interés, y especialmente las localizadas en ambientes sedimentarios con cubiertas inactivas y presencia de suelos, las investigaciones se efectuaron por medición de radón utilizando vasos de la compañía Terradex, en los niveles de prospección sistemática y detallada.

Hasta ahora no es posible hacer una evaluación sobre las bondades de esta técnica ya que, habiéndose obtenido resultados relativos, puede ser que las condiciones de emplazamiento de las áreas de interés investigadas no presenten las características adecuadas para una mejor aplicación del método, como parece ocurrir en otros países.

##### 4.3. Emanometría

Otra de las técnicas de exploración por medición de radón, que COBOEN ha introducido este año (1978), es la emanometría.

Actualmente su empleo se limita a las anomalías de control estructural con el fin de seguir fallas cubiertas, eventualmente mineralizadas de uranio, como parece ocurrir en los alrededores de la mina uranífera de Cotaje.

Aparentemente, los resultados del empleo de este método pueden considerarse positivos, teniendo en cuenta la sencillez y rapidez de su utilización y sobre todo la respuesta inmediata que proporciona.

#### 4.4. Geoquímica de suelos y aluviones

Otro proyecto de exploración masiva que se inició recientemente es la prospección geoquímica de suelos y aluviones. El primer intento ha tenido lugar en los alrededores de un indicio uranífero conocido, con el fin principal de determinar los parámetros orientativos del método, para luego aplicarlo especialmente en las áreas de morfología cordillerana que presenten buenas condiciones para la dispersión del uranio.

El proyecto contempla, además de los análisis de uranio por métodos fluorimétricos, el análisis de otros elementos de asociación típica, que serán determinados por absorción atómica.

Con este objeto, también se introducirá en un futuro cercano el equipo canadiense Scintrex U-A3.

Para el proceso de los datos geoquímicos, COBOEN ha previsto el uso de la computadora digital Mod. PDP 11-34.

#### 4.5. Perforaciones a diamantina

En los últimos años y en colaboración con AGIP-URANIUM, así como con la Asistencia del OIEA, COBOEN ha perforado con taladros a diamantina un total de 21 000 m, desde fases de reconocimiento hasta fases sistemáticas; el promedio de profundidad de los sondeos es de aproximadamente 100 m. Sin embargo, en muchas ocasiones se alcanzaron niveles más profundos, siendo el máximo de 600 m.

### 5. DATOS ESTADISTICOS

He aquí una recopilación de los datos estadísticos principales sobre la exploración de uranio en Bolivia:

— Area explorada	70 000 km <sup>2</sup>
— Prospección aérea	36 000 km <sup>2</sup>
— Ala fija	24 000 km lineales
— Helicóptero	38 000 km lineales

—	Prospección terrestre general	20 000 km <sup>2</sup>
—	“Track etch”	90 km <sup>2</sup>
—	Emanometría	3 km <sup>2</sup>
—	Perforaciones a diamantina	21 000 m
—	Horas de vuelo en helicóptero	3 500 h
—	Inversiones efectuadas en los últimos 4 años	9 000 000 dóls.

## 6. CONCLUSIONES

De lo expuesto anteriormente se puede deducir que gran parte de las técnicas de exploración aplicadas en la mayoría de los países que cuentan con programas de prospecciones uraníferas, están siendo empleadas en Bolivia, de acuerdo con los recursos disponibles.

Si aún no se cuenta con resultados espectaculares, se debe únicamente a la naturaleza propia de este tipo de actividades, que además de los esfuerzos financieros requiere un tiempo muerto necesario para la culminación exitosa de un proyecto.

## DISCUSSION

C. PREMOLI: About the last data you gave us, 3500 hours of helicopter time seems rather high. Does that refer to productive time?

V. VIRREIRA: The figure of 3500 refers to the total hours flown, i.e. prospecting, transport of personnel, and so on. However, 80% of the time was for exploration.

L.E. PEREZ: The yield from the aerial prospecting work seems to be low in view of the number of helicopter hours. Could you tell us the cost per linear and per square kilometre?

V. VIRREIRA: In view of the topographic conditions in the areas worked, especially the difficulty of access, the helicopter proved an important logistical support tool. A high proportion of the flight time was used for the transport of equipment and personnel. However, the exploration yield can be considered as optimum in view of the grid size and the velocity values used. The costs are approximately US \$23 per linear kilometre and US \$60 per square kilometre.

A.E. BELLUCO: Is the 20 000 km<sup>2</sup> area covered by ground exploration different from the region where the aerial survey was carried out?

V. VIRREIRA: The major part of the 20 000 km<sup>2</sup> was, in fact, in areas to the west of the eastern Cordillera or the Palaeozoic block.

# **COST-EFFECTIVE GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS FOR URANIUM EXPLORATION**

J.C. HASBROUCK  
Geometrics Inc.,  
Sunnyvale,  
California,  
United States of America

## **Abstract-Resumen**

### **COST-EFFECTIVE GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS FOR URANIUM EXPLORATION.**

When planning a uranium exploration survey the question always arises as to how to take advantage of the different exploration methods and equipment for maximum probability of success. Discussed here are the choice of radiometric geophysical equipment, its effectiveness in identifying targets, its limitations, and the criteria for selection. Particular attention is given to systems that are suitable for the exploration programmes of small size and on a small budget, that are common in Latin America.

### **SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO GEOFISICO DE COSTO EFICAZ PARA LA EXPLORACION DE URANIO.**

Al planear un levantamiento para la exploración de uranio se plantea siempre el problema de cómo aprovechar las ventajas de los distintos métodos y equipo de exploración para tener una probabilidad máxima de éxito. Se describe: 1) la selección del equipo geofísico de radiometría, 2) su eficacia para la detección de zonas favorables, 3) las limitaciones del equipo, y 4) criterios para la selección de equipo. Se presta particular atención a los sistemas apropiados para los programas de exploración de pequeña envergadura y presupuesto limitado corrientes en América Latina.

Many different sizes (and costs) of geophysical equipment packages may be effectively used in the exploration for uranium resources. However, the objectives of the exploration programme must be carefully matched and balanced with the inherent practical limitations always present. While wanting to take advantage of the most recent technological improvements, often last year's methods and equipment will provide an equal probability of success within a more practical framework. These thoughts give rise to various important questions that must be answered during initial planning and that will have great impact throughout the life of the programme:

- (1) Which equipment and methods should be used, e.g. scintillometer, spectrometer, ground, borehole, vehicle, or airborne?

- (2) How large an area is to be surveyed and over what time frame? (This will determine, in many cases, the size and cost of equipment packages and surveys.)
- (3) Is the survey of a broad reconnaissance (regional) nature or a detailed follow-up of previous efforts? (This will have a very definite effect on what type of instrumentation and procedures will be used.)
- (4) What type of terrain is to be covered and should light aircraft, helicopters, ground vehicles, or 'man carry' ground teams be used?
- (5) Are trained personnel available to undertake the data collection? (The different equipment available has various degrees of complexity of operation.)
- (6) Are computer facilities available and would their use materially enhance the survey results? (Both questions should be asked simultaneously. Depending upon the objectives of a survey, sometimes satisfactory results may be obtained without the use of a computer even though one may be available.)
- (7) What is the available budget and how should it be allocated for the largest geological information return?

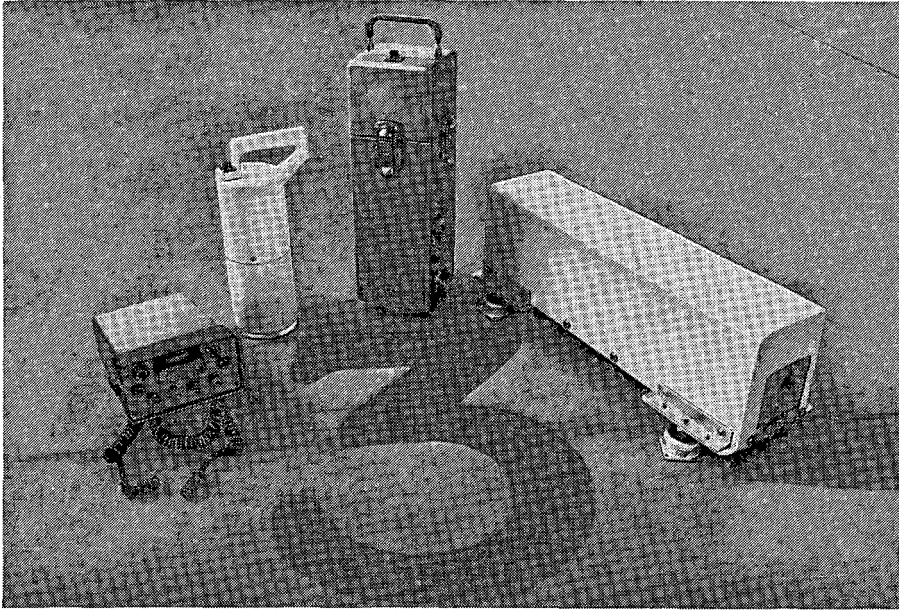
When answering these questions, and others, it must be borne in mind that the effectiveness of any mineral exploration method should be evaluated by its ability to recognize targets of economic interest and to eliminate anomalies caused by non-economic features. Many different equipment system configurations are available which provide a low cost and versatile means of searching for strong anomalies of uranium or thorium. This presentation discusses the small differential spectrometer systems that may be used in light helicopters, fixed-wing aircraft, vehicles for ground follow-up and also, briefly, the large full spectrum airborne spectrometer systems with large crystal size.

For small radiometric equipment packages the system weight and size are usually limited by the type of aircraft or vehicle involved to a total of less than 100 lb,<sup>(1)</sup> with an allowance for easy installation and/or reconfiguration for slightly different applications. Budgetary restraints often limit the total cost with the provision that enhanced capability and performance can be added from year to year. The system also must exhibit a high level of versatility to readily adapt to 'man carry portable' or borehole logging use, thus providing inherent cost effectiveness. Finally, the crystal detector selected must exhibit the proper characteristics as otherwise the entire effort will be jeopardized.

A system meeting these requirements may utilize a four-channel differential window spectrometer capable of using different crystal sizes (Fig.1). Since, from a practical standpoint, crystal size will determine the overall system

---

<sup>(1)</sup> 1 lb =  $4.536 \times 10^{-1}$  kg.



*FIG.1. Four-channel differential window spectrometer.*

sensitivity and cost, a careful balance of all major system components is required to ensure that such high cost factors produce the greatest return on investment. It has been shown in previous studies that an increased area of coverage can be obtained by flying at a higher altitude without a loss in sensitivity by increasing the crystal volume. This, of course, may result in lowering the total amount of line miles flown in a particular area. Since the crystal is the highest single cost item yet plays such a critical role in the overall performance of the system, it is suggested that at least 50% of the funds available for the radiometrics system expenditure be allocated to this single item.

Digital recording techniques have advantages for any type of survey but often the cost of such an item (and the inherent computer processing and software) preclude it from being included in a small, low cost radiometric system. Therefore, the choice of a recording device is usually limited to various real time analog recorders readily available at a relatively low cost. Most analog recorders with four or more channels are designed for rack mounting and weigh, with the rack, in the vicinity of 40 lb or more. Also, the cost of such recorders is in the US \$5000 or greater category and they often require a DC to AC power inverter and associated cabinet. For small systems, a recorder of such size and cost is not a good match.

However, the cost and weight of an analog recorder may be optimized in a small system by reducing the number of channels to two. This unit should be lightweight, consume low power (from a wide range of input voltage), be compact and be capable of recording any two of the four channels (T/C, K, U, or T) simultaneously. An added advantage will be that the spectrometer may be removed to be used in a portable field mode of operation.

For a small radiometric system the compromise resulting from recording only two channels is very slight since only in the case where a large anomaly is found will the counting rate in the K, U, or T channels be high enough for reasonable direct analog recording. For example, a system with 256 in<sup>3</sup> of crystal,<sup>(2)</sup> flying at 400 ft altitude,<sup>(3)</sup> will have a maximum counting rate of 35 counts/s in the K energy region due to potassium on the ground. Average values will be 10 counts/s or less.

A two-channel recorder operating with one channel on the T/C (total count) 0.4 to 3.0 MeV window, and the other channel operating on the thorium energy window from 2.42 to 2.52 MeV will be quite effective since all large T/C anomalies which show no thorium response are most likely due to uranium and should be noted for future follow-up study. In the case where both total count and thorium show anomalies the total count can be 'stripped' for its thorium response and a net total count obtained for purposes of ranking uranium potential.

Much of what has been discussed previously in relation to airborne systems also applies to small crystal vehicle systems. In this type of operation, frequent stops should be made to obtain accurate (long-term) accumulation of counts. Also, the spectrometer may be removed from the recording system and used in its portable mode to localize the maximum reading for any particular anomaly.

Such light systems may also be used for winch or hand-drawn borehole probe applications. Again, the T/C and thorium channels should be recorded initially with any anomalies noted so that on the trip back up the hole K and U channels may be selected for plotting.

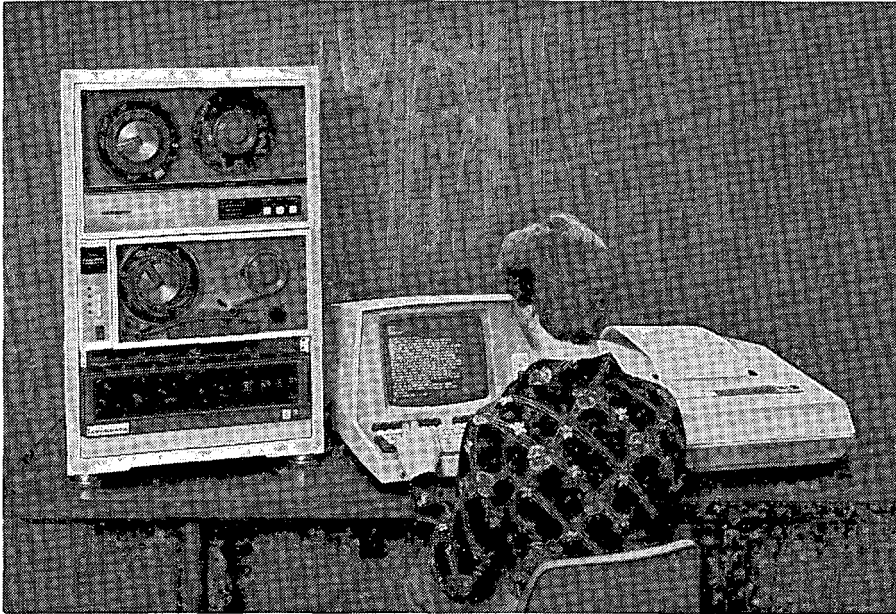
So far only analog recording systems have been discussed. In slightly larger systems the next step is to use digital recording. Small, inexpensive cartridge-type recorders are now available which could be used by low budget organizations. This unit is capable of recording 250 000 BCD characters and outputs data via an industry standard RS-232C interface (common to most computers). These systems do not supplant the big system approach but are intended for those cases where the benefits of computer processing and analysis cannot be given up.

Up to this point low-priced cost-effective small radiometric systems have been discussed. In many cases, however, the potential returns will justify

---

(2) 1 in<sup>3</sup> =  $1.639 \times 10^4$  mm<sup>3</sup>.

(3) 1 ft =  $3.048 \times 10^{-1}$  m.



*FIG.2. Complete stand-alone system for initial verification, display and processing of airborne radiometric data.*

the use of larger systems. The basic components of such a system consist of (1) a multichannel (usually 256 channels) spectrometer that is capable of measuring T/C, K, U, T, selected ratios and cosmic and radon background, (2) a detector interface that provides high-voltage power supply controls, circuitry for precise calibration of each crystal, and maintenance of temperature within all crystal packages and, usually, (3) large crystal detector assemblies. Often systems of this size and cost will be combined with a digital data acquisition system that records the data on computer compatible magnetic tape, and an analog or CRT display for accurate calibration on the ground or spectral analysis and display of anomalous uranium readings while in the air during a survey. One great advantage of the CRT display is that it will provide immediate in-flight verification that all data are correctly recorded on magnetic tape and are recoverable for ground-based computer processing.

Initial verification, display and processing of airborne radiometric data can be performed at the field base site by a complete stand-alone system for use at the field base site (Fig.2). Such systems allow for the immediate post-flight verification of all data recorded on magnetic tape, provide tape recopy and initial editing if required and, perhaps most importantly, *allow for individual*

*profile and selected anomaly analysis* with visual display and hard copy records. All these functions may be completed within a few hours after data acquisition and will provide a very quick and cost-effective means of reaching decision points and guidelines for conducting the rest of the airborne programme, follow-up data mapping (or processing) if required, and ground follow-up investigations.

Intense portable ground follow-up investigations may be made with either the basic scintillometer or four-channel differential window spectrometers.

Apart from radiometric instrumentation there are other geophysical exploration systems used in the search for uranium. These tools do not correspond directly to the accumulation of uranium, such as with a scintillometer or spectrometer; however, they may be of use in a total exploration programme. These include the magnetometers and signal enhancement seismographs.

Depending on constraints such as budget, the size and terrain of the area to be surveyed, the type of survey to be performed, the availability of trained personnel and the availability of computer facilities, a geophysical survey system may be chosen that will solve the exploration problem in a cost-effective manner. Also, depending upon the above criteria, the leasing or the acquisition of used and reconditioned instruments may be made with the final goal being to recognize targets of economic interest and to eliminate anomalies caused by non-economic features in the most efficient and cost-effective manner.

# METODOS INDIRECTOS DE PROSPECCION DE URANIO APLICADOS POR NUCLEBRAS

C.A. da VINHA  
NUCLEBRAS (DRM),  
Fortaleza, Brazil

## Abstract-Resumen

### INDIRECT METHODS OF URANIUM PROSPECTING BY NUCLEBRAS.

The implementation of the Brazilian nuclear programme required a clear definition of the availability of uranium resources in the country. To carry out this mission the Department of Mineral Resources (DRM) – NUCLEBRAS, in the last four years, developed and applied an exploration system for area selection, anomaly prospecting and resources evaluation. In all these exploration phases indirect methods are used, mainly aerial and ground geophysical surveys, remote sensing, geochemical surveys and borehole logging. Described here are the exploration methodology used by the DRM, the conditions of this application and the results obtained in different geological environments.

### METODOS INDIRECTOS DE PROSPECCION DE URANIO APLICADOS POR NUCLEBRAS.

La ejecución del programa nuclear del Brasil requería conocer bien la disponibilidad de recursos uraníferos del país. Para cumplir esta misión el Departamento de Recursos Minerales (DRM) de NUCLEBRAS, en los últimos cuatro años, estableció y aplicó un sistema de exploración para selección de zonas, prospección de anomalías y evaluación de recursos. En todas estas fases de exploración se aplican métodos indirectos, sobre todo investigaciones geofísicas aéreas y terrestres, teledetección, estudios geoquímicos y perfilaje de sondeos. Se describen los métodos de exploración aplicados por el DRM, las condiciones de esta aplicación y los resultados obtenidos en diferentes ambientes geológicos.

## 1. INTRODUCCION A LA PROSPECCION DE URANIO EN BRASIL

La prospección de minerales radiactivos se inició en el Brasil en 1952, a través de la labor del Consejo Nacional de Desarrollo, cuando fueron descubiertos los primeros indicios uraníferos en las rocas volcánicas alcalinas de Poços de Caldas, Estado de Minas Gerais y en los metaconglomerados auríferos de Jacobina, Estado de Bahía. Esta fase dependió inicialmente del apoyo tecnológico externo, principalmente en función de los acuerdos de cooperación técnica con el gobierno norteamericano para el conocimiento del potencial de uranio del Brasil. La cooperación americana se extendió hasta el año 1960.

CUADRO I. EVOLUCION DE LAS ACTIVIDADES DE LA DIRECCION DE RECURSOS MINERALES DE NUCLEBRAS

ACTIVIDADES	1975	1976	1977	1978 <sup>1</sup>
Aerogeofísica (zona en km <sup>2</sup> )	27 000	336 600	757 600	67 600
(líneas de vuelo — km)	18 000	302 331	164 292	77 500
Reconocimiento topográfico (km <sup>2</sup> )	128 000	8 889	76 225	3 500
Levantamiento radiométrico (ha)	10 657	2 056	542	5 000
Geofísica terrestre	920	66 020	183 650	140 670
Levantamiento topográfico (ha)	10 657	2 032	588	8 200
Perfiles topográficos (km)	113	—	648	150
Levantamiento aerofotogramétrico (km <sup>2</sup> )	—	2 796	8 610	2 000
Levantamiento geológico semidetallado	—	800	10 000	20 000
Levantamiento geológico detallado	10 657	4 499	52 414	36 000
Prospección geoquímica (area en km <sup>2</sup> )	—	—	16 387	9 000
(nº de muestras)	364	2 541	12 963	12 000
Concentrado de minerales pesados (nº de muestras)	6 725	7 200	15 200	12 500
Apertura de trincheras y pozos (m <sup>3</sup> )	1 065	2 227	4 238	1 300
Apertura de galerías (m)	270	775	230	1 100
Sondajes (m)	43 500	39 241	41 536	76 200
Perfilajes (m)	35 500	54 241	34 274	76 200
Proyectos (nº de proyectos)	26	38	64	118

<sup>1</sup> Datos estimados.

En 1962, con la creación de la Comisión Nacional de Energía Nuclear y ya contando con un acuerdo de cooperación técnica firmado con Francia, se procedió a una actividad más sistemática y metódica de evaluación del potencial uranífero del país. Con esta ocasión también, se incorporaron los primeros geólogos brasileños para la búsqueda de uranio y torio. El período francés duró de 1961 a 1966.

A partir de 1970, al incrementarse al apoyo financiero, las actividades de prospección de minerales radiactivos tuvieron gran desarrollo y posibilitaron un mejor conocimiento de las evaluaciones anteriores, proporcionando la definición de los yacimientos de Poços de Caldas (Minas Gerais) y de Figueira (Paraná).

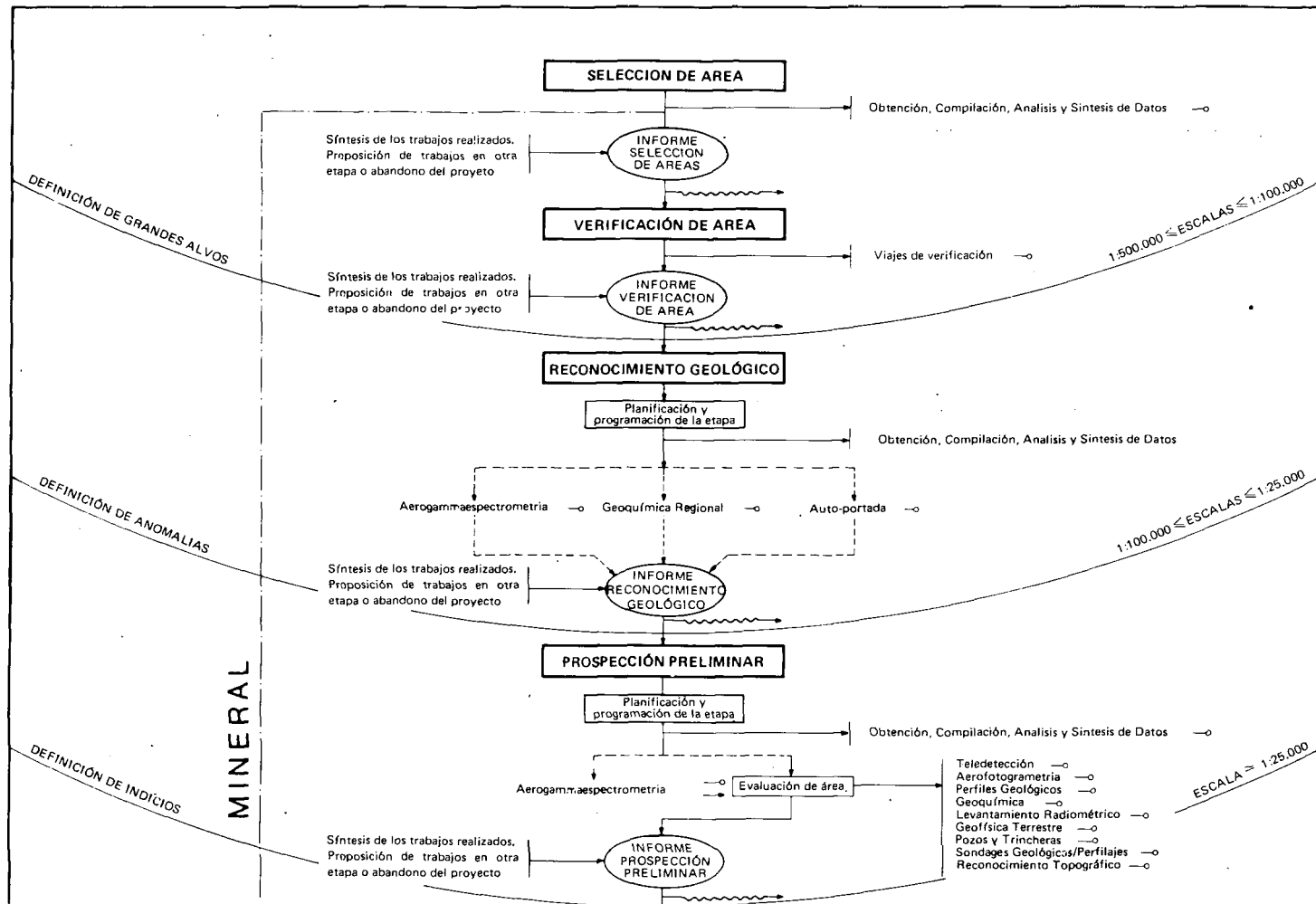
En diciembre de 1974, contando con la definición y estructuración de un programa nuclear, se creó NUCLEBRAS – Empresas Nucleares Brasileñas S.A., una empresa estatal y monopolizadora en el campo nuclear. NUCLEBRAS, inmediatamente después de su creación, pasó a disponer de los técnicos que venían de la Comisión Nacional de Energía Nuclear y a contratar personal propio formando un cuadro de geólogos e ingenieros brasileños para cumplir un aspecto básico del programa nuclear brasileño: la prospección, exploración, desarrollo y explotación de yacimientos de uranio.

Dentro de NUCLEBRAS se estructuró la Dirección de Recursos Minerales, teniendo como responsabilidades la ejecución de las actividades de prospección y exploración de minerales radiactivos, y el desarrollo de métodos y procesos de explotación y extracción del uranio del mineral. Hoy, NUCLEBRAS cuenta con un equipo de alto nivel técnico que reúne una experiencia considerable en el tratamiento de los problemas geológicos, mineros y metalúrgicos en el campo de la búsqueda y evaluación de yacimientos de uranio, así como para la factibilidad tecnológica de producción de concentrados de uranio. Lo expuesto se refleja en los datos sobre la evolución de las actividades que se indican en el Cuadro I.

## 2. METODOLOGIA

La búsqueda de uranio o de cualquier otro mineral no depende solamente de los recursos financieros y del personal técnico, sino que es necesario también definir una filosofía de trabajo y un sistema que permitan la real evaluación de las zonas exploradas. NUCLEBRAS, consciente de esas necesidades, estructuró en su ámbito mineral varios grupos de trabajo para la ejecución de actividades en los campos de la geología, prospección, exploración y de ingeniería mineral.

Al grupo de geología le corresponde el amplio análisis geológico y la selección de grandes zonas de interés; al de prospección y evaluación la ejecución efectiva de los trabajos que conducen a la definición de yacimientos y, finalmente, al de ingeniería mineral la responsabilidad de las actividades de desarrollo de procesos de extracción de uranio y la determinación de complejos industriales de producción de concentrados de uranio.



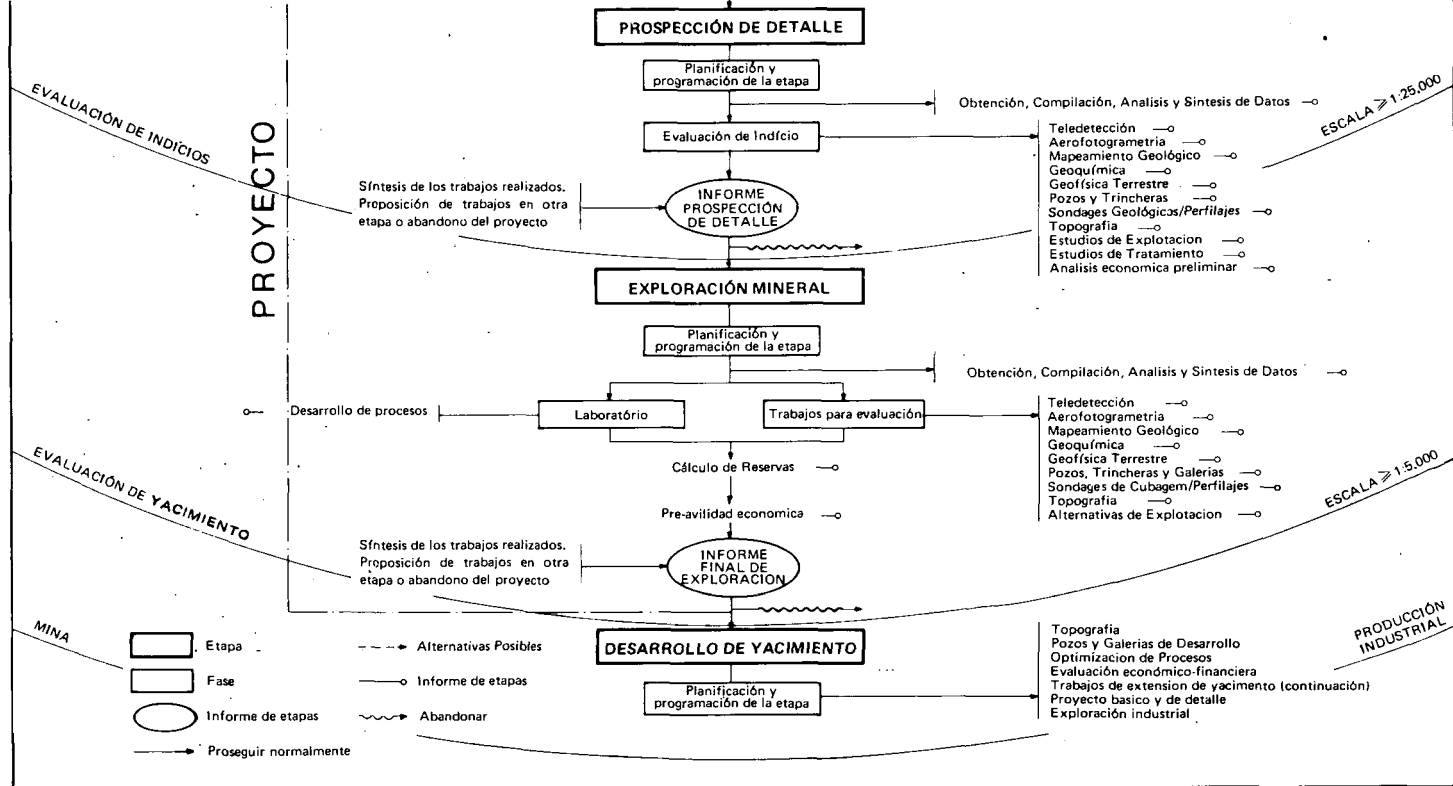


FIG.1. Esquema del programa de prospección de uranio de NUCLEBRAS.

Desde un punto de vista pragmático y según se muestra en la Fig. 1, la Dirección de Recursos Minerales tiene sus actividades divididas en los siguientes subprogramas:

- Selección y verificación de zonas
- Prospección
- Exploración
- Ingeniería mineral
- Desarrollo de yacimientos
- Desarrollo de métodos

Así, a partir del análisis de favorabilidad geológica de grandes zonas y de levantamientos geoquímicos regionales, aerogeofísicos o radiometría autoportada, se definen áreas menores a considerar para la prospección preliminar y de detalle, evaluándose las anomalías y definiéndose los indicios de uranio, sea en trabajos de superficie o por sondeos exploratorios, hasta lograr el desarrollo del yacimiento en mina.

Paralelamente, se elaboran proyectos de perfeccionamiento técnico para la optimización de métodos indirectos de prospección mineral, para la construcción de equipos y para el desarrollo de programas de computación electrónica aplicables a las actividades del campo mineral.

### 3. GEOFISICA

#### 3.1. Aerogeofísica

La aerogammaespectrometría es, sin duda alguna, el método más utilizado para la rápida evaluación de las zonas con favorabilidad uranífera, conformando conjuntamente con el análisis de datos geológicos existentes los trabajos iniciales del subprograma de selección y verificación de zonas. A este método se debe el descubrimiento de los primeros indicios de los actuales yacimientos de Amarinópolis y Lagoa Real.

Así, en cuatro años, NUCLEBRAS contrató la ejecución de 562 123 km de líneas de vuelo, cubriendo un área de 1 188 800 km<sup>2</sup> en varias regiones del país, conforme se muestra en la Fig. 2. Si se consideran los otros organismos gubernamentales que asocian la gammaespectrometría a sus levantamientos aeromagnetométricos, las cifras anteriores pueden duplicarse, obligando a las compañías brasileñas de aerolevantamiento a que estén estructuradas tanto técnica como materialmente para satisfacer esa demanda.

A NUCLEBRAS le incumbe el control de la ejecución de estas actividades a través de especificaciones técnicas rígidas, a fin de que la calidad en el acopio de datos y todo el esquema de reducción permitan una mejor interpretación.

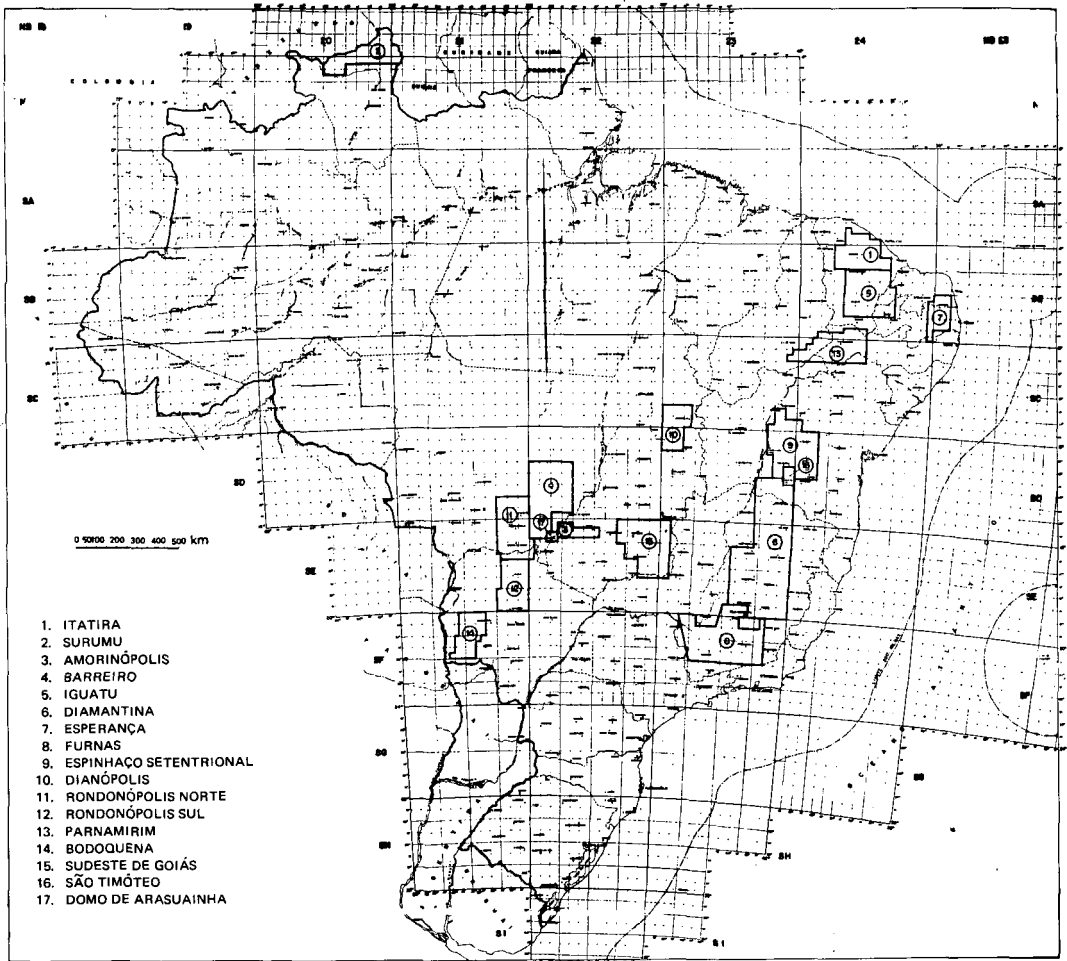


FIG. 2. Levantamiento aerogeofísico ejecutado por NUCLEBRAS en el Brasil.

Además de eso, se puede citar el esfuerzo requerido en la interpretación y verificación en el campo de esos proyectos y la necesidad real de criterios objetivos para la definición de zonas anómalas sin generación desmesurada de anomalías.

### 3.1.1. Rutina de interpretación aerogammaespectrométrica

Antes de cualquier análisis de los datos de aerolevantamientos, se dividen éstos en dos conjuntos, uno desde el punto de vista geológico, a través de los mapas geológicos existentes que no siempre tienen la precisión deseable para la caracterización de las litologías presentes, y otro desde el de la radiometría residual.

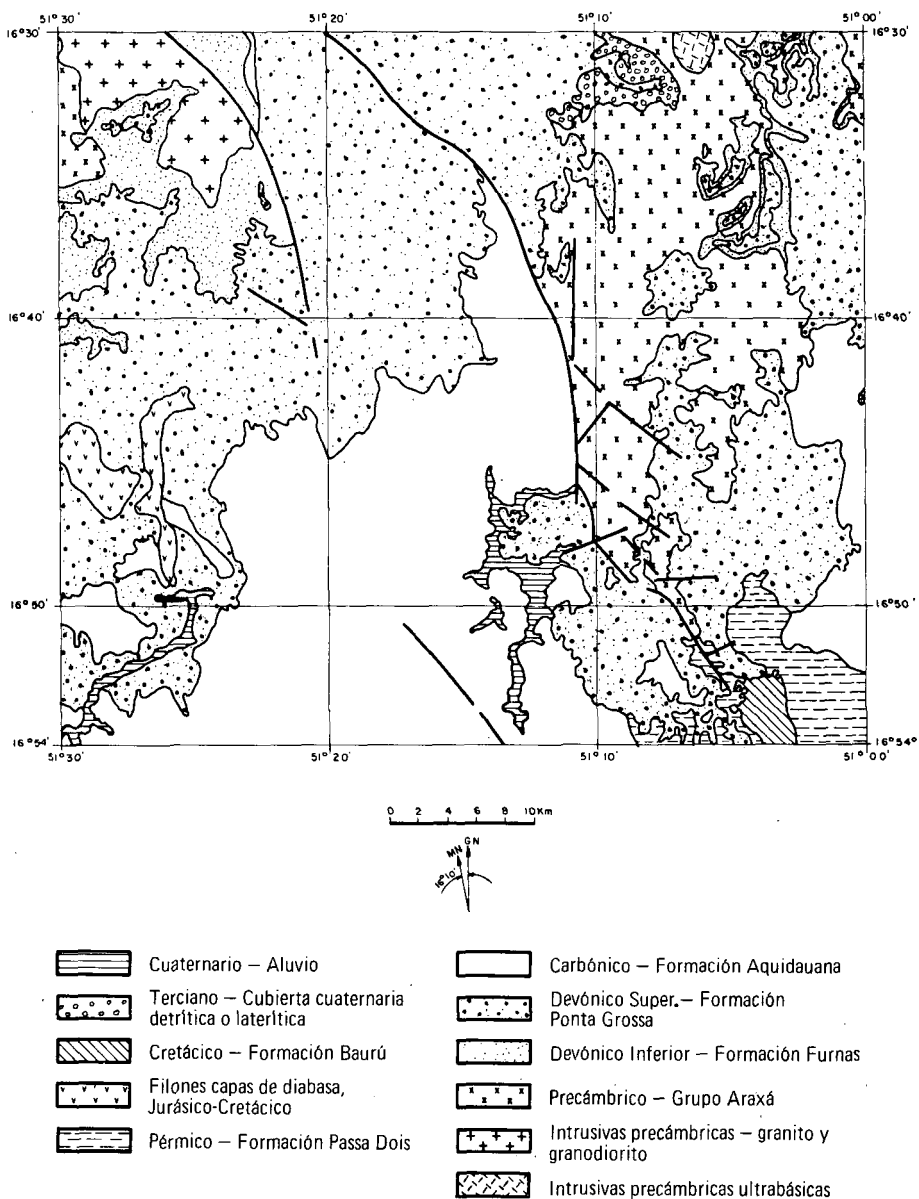


FIG.3. Proyecto Amorinópolis. Mapa geológico.



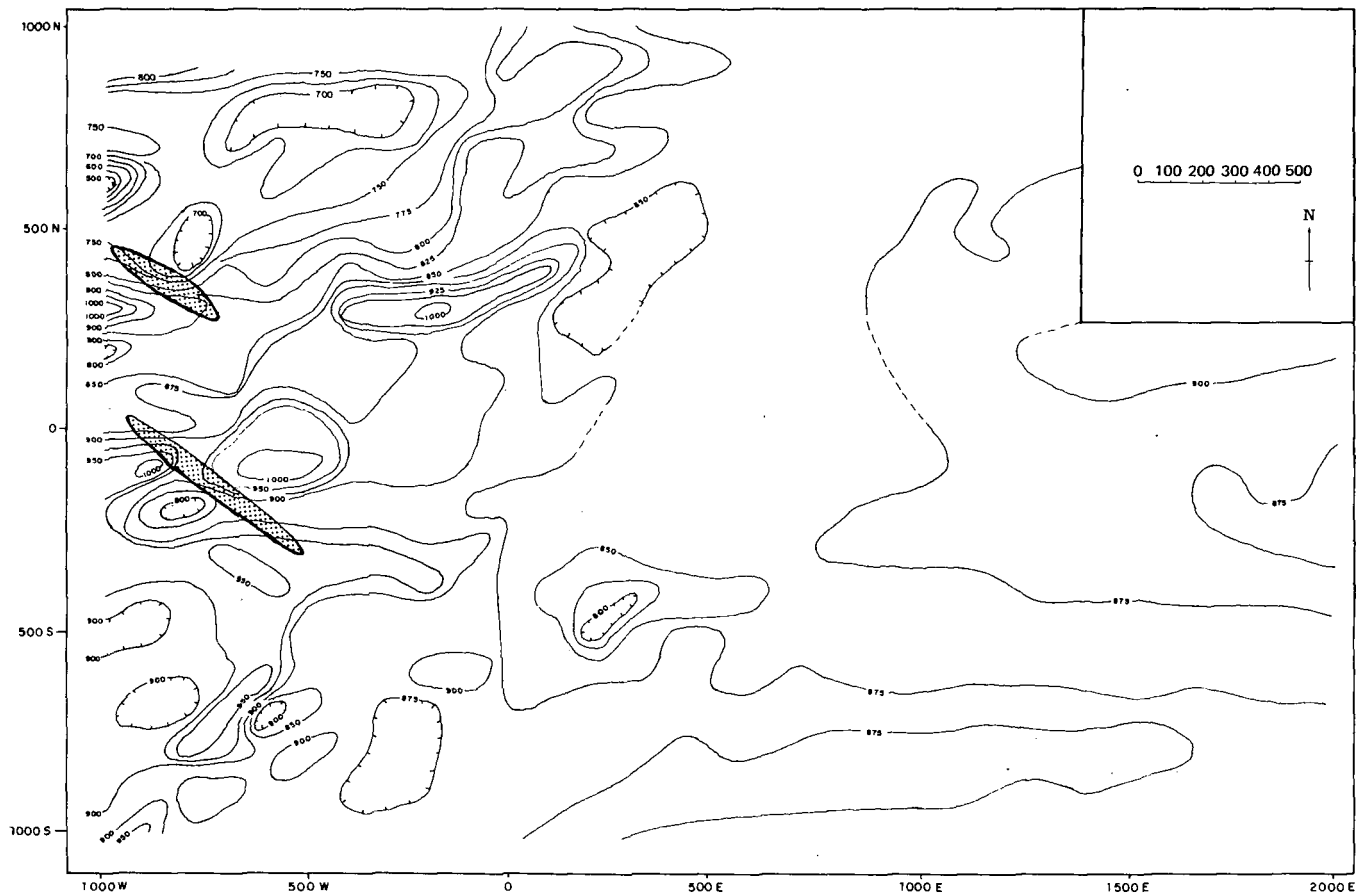


FIG.5. Proyecto Venturosa. Mapa magnetométrico terrestre - Intensidad magnética total.

Toda esta rutina de interpretación se refleja en las Figs 3 y 4, donde las 6 clases en que se dividieron los datos (utilizándose como variables los canales de potasio y conteo total) presentan una buena correlación con la geología, y las anomalías indicadas son las que realmente presentan representatividad en el terreno, independientemente del tamaño del yacimiento.

Conviene aún destacar que esta rutina puede ser totalmente automatizada, lo cual, para un primer análisis de la potencialidad del área, presenta ventajas de rapidez, sea para interpretación o para verificación en el terreno de los puntos escogidos, pues el número de anomalías queda bastante restringido. Esta primera verificación en el campo puede conducir, en lo referente al interés de los puntos anómalos dentro del contexto geológico local, a una reinterpretación del levantamiento (con mayor detalle y fajas mejor definidas), lo que desde un punto de vista del proceso de datos corresponde simplemente a un cambio en el valor de los parámetros de comparación. Por ejemplo, en lugar de indicarse los puntos separados de la media en más de 4 desviaciones standard, se señalarían los separados por más de 3 desviaciones standard.

### 3.2. Geofísica terrestre

Nuevamente, dentro de los métodos geofísicos terrestres aplicados por NUCLEBRAS, la radiometría es la más utilizada, excepto para objetivos bien definidos y específicos, donde se recurre a la magnetometría, resistividad, sísmica y emanometría, principalmente cuando se trata de trabajos de detalle y/o semidetalle.

#### 3.2.1. Radiometría autoportada

NUCLEBRAS ha utilizado este método por su extrema baratura y rapidez para cubrir regiones con buena densidad de caminos. Con esta técnica se encontraron los primeros indicios del actual yacimiento de Itataia. En efecto, en 1975 se levantó una gran zona en el noreste brasileño (Proyecto Canindé) registrándose 272 anomalías en el levantamiento autoportado, de las cuales se seleccionaron 13 por su contexto geológico para estudios más detallados. De éstas, la anomalía denominada 62 se transformó en el yacimiento de Itataia, con 71 000 t de  $U_3O_8$ .

La técnica de prospección autoportada está siendo experimentada también en la región de Amazonía, con la utilización de detectores de grandes dimensiones montados en barcos. Así se intenta obtener una mejor respuesta de la radiometría en regiones de vegetación densa y sin accesibilidad por carreteras.

#### 3.2.2. Magnetometría

A pesar de tener uso restringido en la prospección de uranio, en algunos casos la utiliza NUCLEBRAS para eliminar dudas en regiones con espesa cobertura de

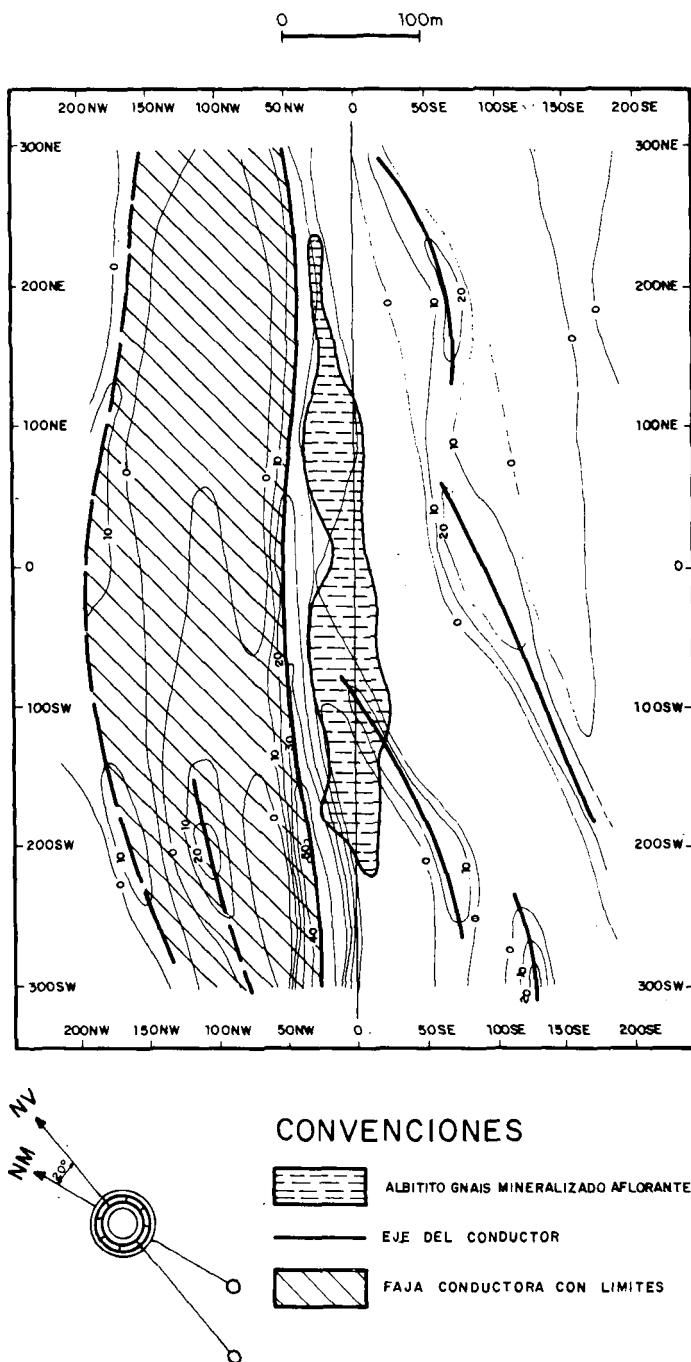


FIG.6. Proyecto Lagoa Real. Componente real-filtro Fraser.

suelo. Se aplicó, por ejemplo, en el Proyecto Venturosa, en la región centro-sur del Estado Pernambuco, en estratos de rocas calcosilicatadas con mineralización de uranio dentro del Precámbrico. El objetivo del levantamiento magnetométrico fue la definición de esos estratos, cuya densidad magnética era mayor que las rocas circunvecinas, en la tentativa de definir su representatividad y eventualmente orientar mejor los sondeos. La Fig. 5 muestra los contornos de intensidad magnética determinados para esa región, pudiéndose verificar que la zona de interés para mineralización es de pequeña dimensión. Los datos de sondeos confirmaron esta indicación.

### 3.2.3. *Métodos electromagnéticos (VLF – EM)*

Ya es usual la utilización de VLF en las zonas de desarrollo de NUCLEBRAS para la complementación del levantamiento de mapas geológicos de detalle, indicándose las estructuras existentes, principalmente en regiones de rocas duras, con cobertura de suelo. La Fig. 6 muestra los contornos filtrados por el método de Fraser de la componente real del campo secundario, a partir de la emisión primaria generada por la estación de Cutter, Maine. Trátase del levantamiento en la región meridional del Estado de Bahía, Proyecto Lagoa Real, donde aparece mineralización de uranio en albitas lineales, limitadas por zonas cizalladas, bastante bien definidas por las rocas conductoras de la zona.

### 3.2.4. *Electrorresistividad*

En varios proyectos de NUCLEBRAS se vienen utilizando levantamientos por electrorresistividad en trabajos de exploración. La aplicación del método en el Proyecto Itatira, región de Itataia, ya citada, donde el objetivo era la definición de los contactos de las rocas fosfáticas, con los calcáreos y episienitas bajo cubrimiento de suelo de varios metros, constituye un ejemplo de la utilización de esta técnica.

A pesar de que, en términos teóricos, las resistividades aparentes de aquellas rocas deberían ser bastante similares, al aplicarse el método se notó que las áreas con colofanita presentaron una resistividad significativamente más elevada que las otras. Esta diferencia en el carácter eléctrico de los suelos a partir de las colofanitas de las otras rocas se debe a la menor cantidad de arcilla generada por las rocas fosfáticas en relación con las otras, permitiendo la definición nítida de los contactos de la roca mineralizada con la roca de caja.

### 3.2.5. *Emanometría*

La elección de la mejor opción dentro de las varias técnicas de análisis por flujo de radón está siendo buscada por NUCLEBRAS, comparándose métodos como Track-Etch, alfanuclear, dosímetros de termo-luminiscencia y la emanometría

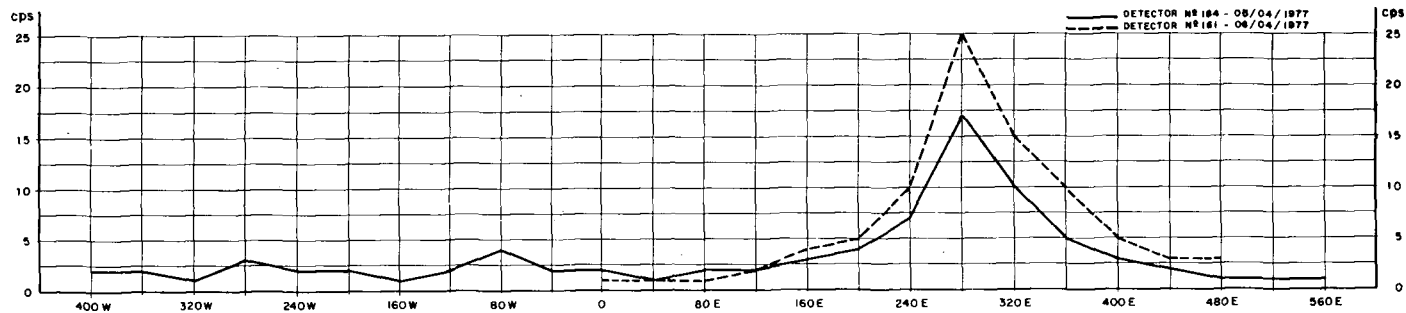


FIG. 7a. Línea test. Medidas de radón en suelos (Sniffer).

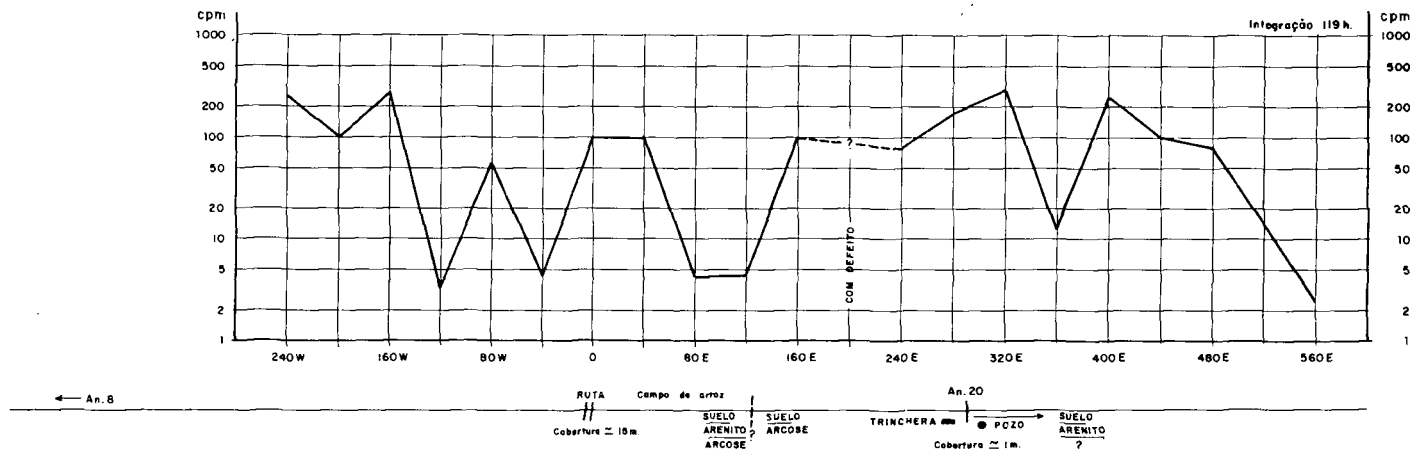


FIG. 7b. Detector tipo "Alpha nuclear".

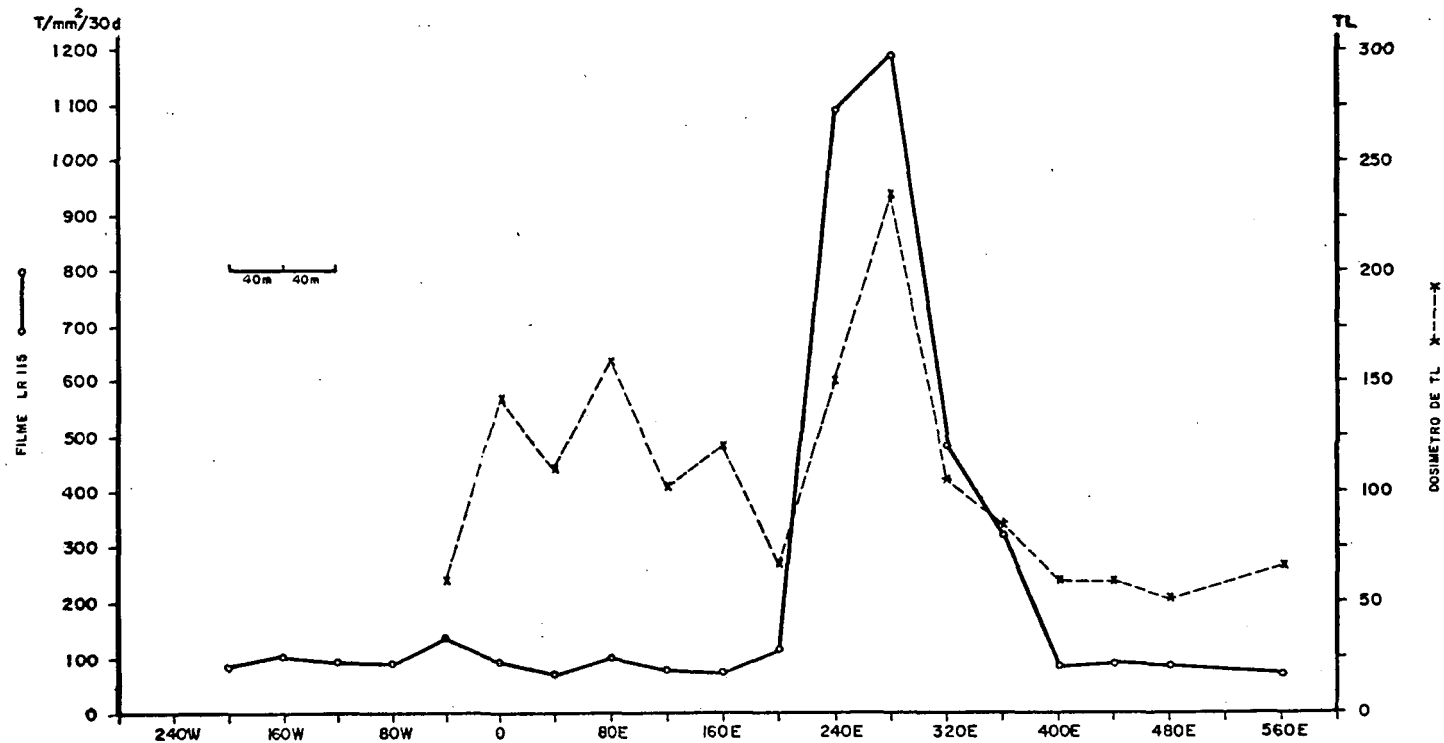


FIG.7c. Proyecto test emanometría. Resultados obtenidos con filmes LR 115 y termoluminiscencia.

convencional ("radon sniffers"). Las Figs 7a, b y c muestran el estudio comparativo de los varios métodos en una zona de prueba del Brasil Central, dentro del Proyecto Amorinópolis, donde aparece mineralización uranífera asociada a arcosa, sobre una cobertura de limolitas y areniscas poco espesas bien definida por sondeos.

Sin considerar el sistema alfanuclear, cuyo modelo utilizado EACUP-1 no presentó respuesta coherente, las otras técnicas mostraron resultados bastante similares, quedando la elección de cualquiera de ellas condicionada al factor económico. Sin embargo, con respecto al TLD, todavía son necesarias investigaciones más profundas, principalmente en el desarrollo de blindajes más efectivos para distinguir la actividad de radiación gamma, eventualmente con la utilización de 2 dosímetros en el mismo detector.

Además, no se debe eliminar la posibilidad de utilización conjunta de esos métodos con la cintilometría en la definición de la representatividad de una anomalía, con relación a la profundidad de la posible fuente emisora.

### 3.3. Perfilaje de pozos

#### 3.3.1. Perfil gamma

El empleo intensivo del perfilaje gamma en todos los sondeos realizados por NUCLEBRAS hizo que se diera suma importancia tanto a la fabricación de equipos en Brasil como a la investigación de nuevas técnicas para análisis cuantitativos de esos perfiles, para la evaluación de recursos de  $U_3O_8$ . Así, ya se construyen en el Brasil equipos de perfilaje gamma de calidad similar a los extranjeros y adaptados a las condiciones, a veces bastante difíciles, de las regiones exploradas por NUCLEBRAS.

Por otro lado, conjuntamente con consultores franceses, se está desarrollando una variación de la técnica de desconvolución del perfil gamma, algo diferente de la técnica tradicional americana indicada por Dodd y Scott, el bien conocido programa Gamma-Log.

#### 3.3.2. Perfilaje de espectrometría-gamma y gamma-gamma

La utilización de equipos de discriminación de energía gamma todavía es reducida en NUCLEBRAS; esos equipos se aplican para la caracterización cualitativa de zonas con sondeos sin testigos, donde se esperan grandes concentraciones de torio y potasio, como en la región de Pozos de Caldas. De igual modo, solamente ahora viene siendo aplicado el perfilaje gamma-gamma, esperándose su empleo rutinario en el futuro.

### 3.3.3. Otros perfiles

Además de los perfilajes rutinarios de potencial espontáneo y resistividad, siempre ejecutados en sondeos con perfilaje gamma, se han realizado ensayos de aplicabilidad de métodos con polarización inducida y termografía en sondeos.

Estos ensayos, cuyo objetivo era la definición de zonas de oxi-reducción en depósitos del tipo “roll” en Amorinópolis, en área con sondeos sin testigos, mostraron que la termografía es bastante promisoría, definiendo la dirección del flujo local del agua y del frente de oxi-reducción. Por el contrario, la polarización inducida no dió resultados tan buenos como los conseguidos por Scott y Daniels en Wyoming.

### 3.4. Sensores remotos

Además de la utilización convencional de las imágenes de satélite, NUCLEBRAS está investigando la aplicación de las técnicas de “pattern recognition” a través del empleo del sistema Image-100, y cintas magnéticas multiespectrales del Landsat.

Algunos ensayos están siendo realizados en zonas con manifestaciones uraníferas, a través de la combinación de los varios canales y diversos filtros. Los resultados aún no son totalmente convincentes, a no ser para el levantamiento estructural de mapas, donde realmente se consiguen contrastes (no siempre nítidos en imágenes convencionales), como por ejemplo la estructura circular indicada por el canal 7 en la región de Itatira, Ceará y asociada el yacimiento uranífero de Itataia.

Sin embargo, los estudios en ejecución están consiguiendo resultados más satisfactorios, principalmente por la elección de imágenes tomadas en la época de sequía y por una mejor selección y localización en la imagen de las zonas de interés.

## 4. GEOQUIMICA

Entre los métodos auxiliares para la prospección y exploración de uranio, la geoquímica reviste particular interés en NUCLEBRAS, debido a los resultados promisorios conseguidos tanto en levantamientos regionales como de detalle, al evaluar el potencial de las áreas, definir dominios geológicos favorables a la mineralización, delimitar zonas anómalas, y al ayudar al entendimiento de los procesos y modelos de mineralización. Por lo tanto, su aplicación viene siendo ampliada de año en año, integrada con otros métodos tanto geológicos como geofísicos y precedida siempre por estudios de orientación, en los que se definen el medio de muestreo, el espaciamiento de las muestras, los elementos a analizar y los métodos analíticos.

Sin embargo, para el aprovechamiento de todo el potencial del método se requiere la implantación de toda una rutina de levantamiento, normalizando la obtención de datos en el terreno, racionalizando el proceso de datos electrónico, e intentando separar las informaciones objetivas de cualquier influencia subjetiva.

#### **4.1. Rutina de levantamiento geoquímico**

Independientemente de que el objetivo del trabajo sea para un levantamiento sistemático, para estudios orientativos o bien para el desarrollo de investigaciones teóricas, los datos acopiados se estructuran dentro de un sistema denominado Sistema de Muestreo Geoquímico.

Este sistema permite el archivo, recuperación selectiva y proceso de datos geoquímicos, a través de técnicas estadísticas uni y multivariadas, utilizándose para ello computación electrónica. Así, las informaciones sobre las muestras se codifican en una planilla; una vez perforada y verificada, pasa a componer, junto con los resultados analíticos, un archivo de datos geoquímicos. A partir de este archivo, los datos son recuperados selectivamente por criterios adoptados por el usuario, pudiendo ser utilizados por varios programas de aplicación que tabulan los datos, calculan parámetros estadísticos, construyen mapas, gráficos, perfiles, o bien permiten el empleo de técnicas más sofisticadas o laboriosas como por el ejemplo de análisis facto-vector.

Conviene destacar que toda esta rutina no pretende eliminar la creatividad del técnico, sino más bien racionalizar todo el servicio, permitiendo:

- salvaguardar las informaciones originales y posibilitar su recuperación futura a bajo costo;
- entregar una biblioteca de programas de computación para proceso numérico de datos, por las técnicas más actualizadas, sin el necesario esfuerzo de programación y de conocimientos más profundos sobre computación electrónica.

#### **4.2. Algunos resultados obtenidos**

En los varios proyectos ejecutados por NUCLEBRAS tanto en regiones sedimentarias como en cristalinas y en diversos climas (de árido a tropical), la geoquímica se ha mostrado como un método eficaz no solo para la localización de áreas para exploración más detallada, sino también para obtener parámetros que permitan una mejor comprensión de la génesis de un yacimiento. Así, el campo de aplicación del método es mucho más amplio que otras técnicas indirectas de prospección, pudiendo y debiendo ser utilizado en todas las fases de búsqueda de minerales radiactivos, para complementar las informaciones sobre el potencial de un área.

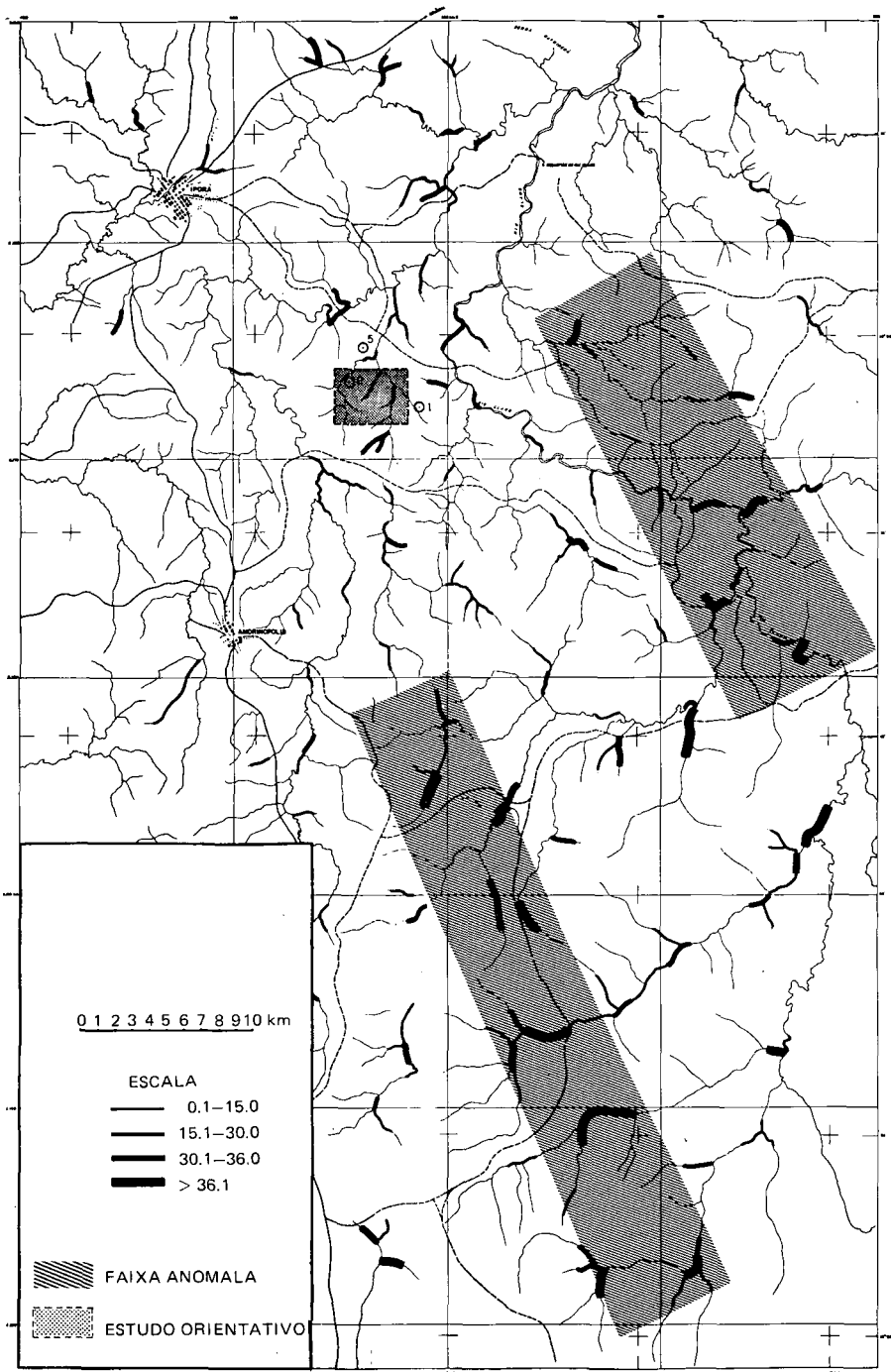


FIG.8. *Projecto Amorinópolis. Mapa de leyes geoquímicas de uranio – Representación por barras.*

Se pueden expresar algunas consideraciones de carácter general a partir de la experiencia de NUCLEBRAS:

- los sedimentos de corriente han demostrado ser el medio más eficaz para la prospección, suplantando las muestras de agua por su mayor facilidad de interpretación;
- la granulometría de colecta más favorable es la de arena gruesa, proporcionando anomalías más significativas, debido al menor transporte;
- el material analizado que presenta mayores contrastes es la fracción inferior a 150 meshes;
- el análisis por neutrones retardados, cuando existe esta facilidad, es aún el método más indicado, debiendo ser asociado entretanto a análisis mineralógicos y fluorimétricos para la definición del significado e importancia de las anomalías encontradas;
- la densidad óptima de muestreo se sitúa en torno a 1 muestra por 3 km<sup>2</sup> para los levantamientos regionales, debiendo evitar ríos cuya cuenca de captación sea superior a 10 km<sup>2</sup>;
- independientemente de otros elementos, el Fe y el Mn siempre deben ser analizados para descartar falsas anomalías;
- en climas tropicales, se debe dar gran importancia al contenido de arcilla, limonita y materia orgánica ya que leyes más elevadas que el “background” regional no se relacionan necesariamente con zonas mineralizadas. Naturalmente, en climas tropicales las muestras se deben tomar siempre con las mismas características desde el inicio hasta el fin de una campaña de muestreo, siendo superflua cualquier discusión sobre si es mejor muestrear material con mucha o poca materia orgánica;
- en zonas sedimentarias los elementos químicos Mo, As y V acompañan las concentraciones locales de uranio, pero sólo en casos especiales pueden ser considerados como “pathfinders”;
- en áreas cristalinas la asociación de elementos es muy variable, dependiendo más del tipo de depósito, como por ejemplo V, Nb e Y en rocas cristalinas;
- el mejor contraste para uranio en muestras de agua se da en la fracción filtrada y, por lo tanto, además de la dispersión iónica, es importante el transporte mecánico a causa de la absorción de uranio en las partículas en suspensión.

Por último, con el fin de ilustrar la aplicación del método para complementar los conocimientos de una zona, en la Fig. 8 se presenta el resultado del levantamiento por sedimentos de corriente en la región de Amorinópolis, en el centro-oeste del Brasil. En esta región aparecen yacimientos de tipo roll, en arcosios devonianos, que afloran al norte en medio de la ladera, y cubiertos al sur por estratos siltíficos y areniscas de edades más recientes.

Otro método viable sería el recubrimiento en malla cerrada por aerogeofísica, pero con el inconveniente de no detectar en la parte sur del área cualquier

anomalía tanto por las características topográficas de afloramiento del arcosio como por la cobertura sedimentaria más nueva. Aquí estriba el gran interés en conjugar el levantamiento aerogeofísico (ya que el área a prospectar era muy grande) con el levantamiento geoquímico. Los resultados mostraron que todas las anomalías aerogeofísicas tenían su contrapartida en la geoquímica y, además, como se esperaba, en la porción SE aparecieron fajas anómalas no detectadas por la aerogammaespectrometría que, como demuestran estudios geológicos en curso, son potencialmente interesantes.

Se puede esperar una situación similar en la región Amazónica pero con la complicación adicional de que existe una densa cobertura vegetal y un desarrollo de suelos espesos; estas condiciones no permitirán obtener una respuesta óptima de la aerogammaespectrometría, a no ser con cristales mucho más voluminosos que los usuales de 1000 pulg<sup>3</sup>. Esa pudiera ser una buena opción a la integración con geoquímica. Los trabajos en ejecución en esa región permitirán la comprobación de esta hipótesis.

### BIBLIOGRAFIA

- CHAMON, N., Magnetometria em Venturosa, Informe final de proyecto, NUCLEBRAS, Brasil (1976).
- CHAMON, N., Electroresistividade em Itaitia, Município de Itaitira, Informe final de proyecto, NUCLEBRAS, Brasil (1977).
- CHAMON, N., HOWARD, S.H.D., Levantamento VLF-EM Lagoa Real, Informe final de proyecto, NUCLEBRAS, Bahía, Brasil (1978).
- CONTE, C.N., Pesquisa de Método em Fotointerpretação, Informe final de proyecto, NUCLEBRAS, Brasil (1978).
- da VINHA, C.A.G., CENSI, A.C., VIEIRA NETO, A.P., Sistema de Estatística de Amostragem Geoquímica, An. XXVII Congreso Brasileño de Geología, 1975, Sergipe (1975).
- da VINHA, C.A.G., VIDAL, J.L., Prospecção Geoquímica em Curso de Prospecção de Minerais Radioativos, Informe interno, NUCLEBRAS, Brasil (1976).
- da VINHA, C.A.G., Informes técnicos trimestrales, NUCLEBRAS, Brasil (1976-1977).
- FORMAN, J.M.A., Urânio no Brasil - Sua Busca e Resultados, An. XXX Congreso Brasileño de Geología, 1978, Pernambuco (1978).
- HOWARD, S.H.D., Teste de Método IP na área AM-1 do Projeto Amorinópolis, Informe final de proyecto, NUCLEBRAS, Brasil (1977).
- HOWARD, S.H.D., Testes de Emanometria, Informe final de proyecto, NUCLEBRAS, Brasil (1977).
- HOWARD, S.H.D., TORRES, M.M., DA VINHA, C.A.G., Análise de Agrupamento em Dados Aerogammaespectrométricos, An. XXX Congreso Brasileño de Geología, 1978, Pernambuco (1978).
- HUIJBREGTS, C., GARCIA, P.A., CENSI, A.C., Cálculo de Recursos por Geoestadística de Figueira, Informe final de proyecto, NUCLEBRAS, Paraná (1977).

LEMOS, J.C., Sensoriamento Remoto na NUCLEBRAS, Informe interno, NUCLEBRAS, Brasil (1978).

NUCLEBRAS, Manual Técnico (1977).

PEREIRA, N.M., Geoquímica Orientativa na Area de Amorinópolis, Informe final de etapa, NUCLEBRAS, Goias, Brasil (1976).

PEREIRA, N.M., Prospecção Geoquímica na NUCLEBRAS, Informe interno, Brasil (1978).

## DISCUSSION

A.E. BELLUCO: I would like to ask two questions. First, within the vast areas indicated as covered by aerial gamma spectrometric surveys, what is the characteristic for the vegetation cover? Second, what would be the average uranium concentration (grade) for the 71 000 tonnes uranium of the Itataia deposit and which is the envisaged type of treatment for this type of ore?

C.A. da VINHA: Replying to your first question I would say that only recently has NUCLEBRAS started prospecting for uranium in the Amazon region. However, the Brazilian Geological Survey (Departamento Nacional de Produção Mineral-DNPM) has been prospecting the Amazon region for many years, and aeromagnetic survey is one of the techniques used by them. As indicated in my presentation, NUCLEBRAS associates with DNPM in these aerial surveys by supplying the aircraft with a gamma spectrometer and also by sharing the survey costs. In this way we are able to take the opportunity of the DNPM operation to collect radiometric information on this vast region of Brazil. In the examples given for this region the anomalies correspond mainly to outcrops within the important soil and vegetation cover. In view of the difficulty of access to these anomalies by normal means, you can imagine the effort and cost for the evaluation of these lithology-related anomalies.

With respect to your second question, I do not have with me the details on the average grade of the Itataia deposit. I can say, however, that within the DRM (NUCLEBRAS) there is a group in charge of developing and applying methods and techniques for ore reserve estimates. This group works carefully and the figure of 71 000 tonnes  $U_3O_8$  corresponds to ore that could be mined in Itataia. Evaluation work, as indicated by Mr. Ayres, is continuing.

J. PASQUALI: Within the framework of these regional aero-geophysical and geochemical surveys, have you undertaken any study of the uranium geochemistry vis-à-vis the weathering processes or, in other words, what is the relation between the surface radiometric information and the uranium content, at different depths, for the various lithologies and soils?

C.A. da VINHA: This is a very interesting question. In the region of Amorinópolis we carried out a complete investigation on the application of different

exploration methods. For example, we combined the aerial survey in the test area with high-density soil sampling as it corresponds to a zone with small uranium ore bodies, which by the way seem similar to some deposits in the northern part of Argentina. Also, different techniques of tele-detection were used, such as radon surveys (several types), drilling, logging, IP, etc. A comparison of the results obtained by the different techniques was also done, and if you are interested I could show them to you after this session. With respect to the uranium behaviour with depth and the radioactive equilibrium, I would say that in all samples from boreholes we make the following analysis: determination of uranium by chemical techniques, radiometric (equivalent) uranium by gamma spectrometry, and uranium by delayed neutrons. This is also done for samples collected from geological profiles during reconnaissance surveys. In the case of Amorinópolis, we found a situation of disequilibrium associated with the zone of water table fluctuation. On the thick soils that occur in the area radium is detected rather than uranium.

**P.M. BARRETTO:** My congratulations for your presentation which is indeed very interesting. I would like to clarify certain points mentioned by you which, I believe, are of interest to all participants who have to face the problem of prospecting uranium in tropical areas. Did you say the geochemical surveys detected anomalies that did not show up in the aerial surveys?

**C.A. da VINHA:** In the Maranhão-Piauí Basin, which is located in the eastern border of the Amazon Basin, an area of 10 000 km<sup>2</sup> was prospected by geochemistry and aerial radiometric survey. The stream sediment survey worked very well, the aerogamma-spectrometric survey depicted mainly the outcrops with higher concentrations of radioactive elements and the different lithological backgrounds rather than the uranium anomalies. This experience can be extrapolated to the Amazon region which has been extensively prospected by the DNPM and the RADAN (Radar Amazonia) project. All government exploration agencies are collecting stream sediment samples with identical field procedures, which allows an interchange of information and samples. For example, DRM-NUCLEBRAS analyses uranium geochemical samples collected by DNPM.

**P.M. BARRETTO:** Could you indicate the number of geochemical samples analysed for uranium per year?

**C.A. da VINHA:** At the moment we should have in our file approximately 200 000 samples which were analysed for 30 elements by the DNPM. Uranium determination is done on those samples corresponding to areas selected by NUCLEBRAS for their uranium potential.

**P.M. BARRETTO:** You mentioned the use of small boats to explore uranium in the Amazon Basin. This Basin extends over several countries present here. Could you give details on how this could be done and if the results are compatible with the effort?

**C.A. da VINHA:** This way of exploring is very interesting. Normally the exploration team will go up the river along one of the margins and will return

along the other. Outcrops occurring in the river channel are visited and sampled in addition to the radiometric survey. Outcrops also occur in the river beds. Geochemical samples are taken, as well as mapping done. The results so far obtained are encouraging. I should add that this way of prospecting is quite dangerous as accidents with the boat and crew can happen at any time. We also used this technique in the Maranhão-Piauí Basin.

### **III. PRELIMINARY RECONNAISSANCE AND REGIONAL FAVOURABILITY STUDIES**

### **III. RECONOCIMIENTO PRELIMINAR Y ESTUDIOS REGIONALES DE FAVORABILIDAD**



# DETERMINACION DE AREAS FAVORABLES PARA LA PROSPECCION DE URANIO EN TERRITORIO BOLIVIANO

E. PARDO

Depto. de Materias Primas,

Comisión Boliviana de Energía Nuclear (COBOEN),

La Paz, Bolivia

## Abstract—Resumen

### DETERMINATION OF FAVOURABLE AREAS FOR URANIUM PROSPECTING IN BOLIVIA.

The most prominent geological, lithological, stratigraphic, orogenic, metallogenetic, palaeogeographic and geochemical features favourable for the concentration of uranium deposits in Bolivia are described. This is a generalized study of the features mentioned above and should provide guidelines for eventual better understanding of the geology of Bolivia in general and that of uranium in particular. The purpose here is to demonstrate rational planning, which could be followed by the determination of favourable areas for uranium exploration, by the Bolivian Nuclear Energy Commission/Comisión Boliviana de Energía Nuclear (COBOEN), and to provide basic information for the drawing up of contracts with foreign and/or national organizations interested in investing in uranium exploration.

### DETERMINACION DE AREAS FAVORABLES PARA LA PROSPECCION DE URANIO EN TERRITORIO BOLIVIANO.

El presente trabajo es una síntesis de los aspectos geológico-litoestratigráficos, orogénicos, metalogénicos, paleogeográficos y geoquímicos más sobresalientes de los sectores favorables con posibilidades uraníferas. Este documento debe ser considerado como un estudio generalizado de los aspectos anteriormente citados y dársele un valor de carácter indicativo provisional, ya que en base a mayores conocimientos de la geología en general y la del uranio en particular en el país, se deberá perfeccionar cada vez más. El objetivo de este trabajo es el de mostrar la planificación racional efectuada por la Comisión Boliviana de Energía Nuclear (COBOEN) en la determinación de áreas favorables para la búsqueda de uranio y el de contar con documentación básica para suscribir futuros contratos especiales con empresas extranjeras y/o nacionales, interesadas en efectuar inversiones en el rubro de la prospección y exploración de uranio.

## 1. DISTRIBUCION DE INDICIOS URANIFEROS Y ZONAS DE CONTRATO COBOEN-AGIP

En la Fig. 1 se puede observar la distribución de los indicios uraníferos estudiados por COBOEN y las zonas del "Contrato de operaciones uraníferas" en que trabajó la empresa AGIP [1].

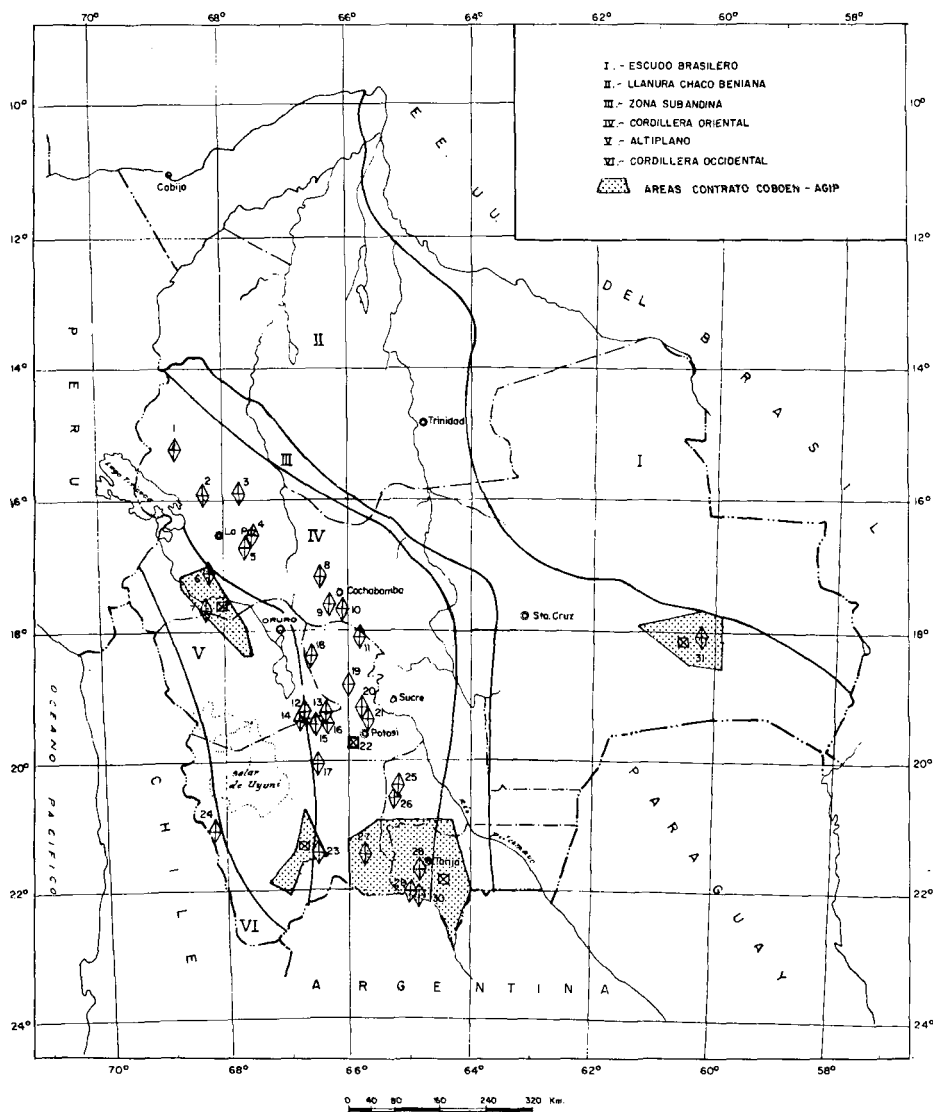


FIG.1. Mapa de distribución de zonas e indicios uraníferos. Zonas contrato COBOEN-AGIP. Unidades morfoestructurales.

Se puede observar que los indicios se encuentran distribuidos en la Cordillera Oriental y el Altiplano, salvo dos excepciones: el indicio de Emborozú, situado en la faja subandina de Tarija y el indicio de San José de Chiquitos, situado en las Serranías Orientales.

En las unidades de la Cordillera Oriental y Altiplano boliviano, en base a criterios de áreas de aporte y de recepción, vemos que, de uno u otro modo,

el plutonismo o el vulcanismo son responsables de la mineralización uranífera; el primero en algunos casos, afectado por el ciclo orogénico hercínico (¿intrusivos de Yani y Zongo? ) de posible edad jurásica y terrenos post-tectónicos, vulcano-clásticos de probable edad pérmica superior (Cordillera de Muñecas), y en los demás casos, por el vulcanismo andino Mioceno-Plioceno y post-Plioceno.

Los controles radiométricos efectuados por COBOEN en los lugares de recogida de mineral, en diferentes sectores del país, arrojaron muestras radiactivas, muchas de las cuales, una vez analizadas en nuestros laboratorios, dieron contenidos importantes de uranio. De esta manera se detectaron gran número de indicios uraníferos en la Cordillera Oriental y el Altiplano, en clara asociación mineralógica W-Sn-U (Charazani, Sorata, Bolsa Negra, La Urania); Ni-Co-U (Ura Huayco, Chullchucani); Cu-U (Chacarilla – Corocoro, Los Lípez).

## 2. INDICIOS URANIFEROS POR AMBIENTES

En geología del uranio se consideran 3 niveles estructurales importantes: el nivel del Algonquiano, plegado y fracturado; el nivel del Paleozoico modelado, y la cubierta sedimentaria, por encima de la discordancia del Paleozoico remodelado.

En la Fig. 2 se agrupan los diferentes indicios en ambientes regionales, tomando en cuenta si pertenecen a modelos de “cuenca sedimentaria” o de “zócalo”, o si son de carácter mixto.

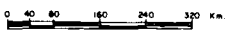
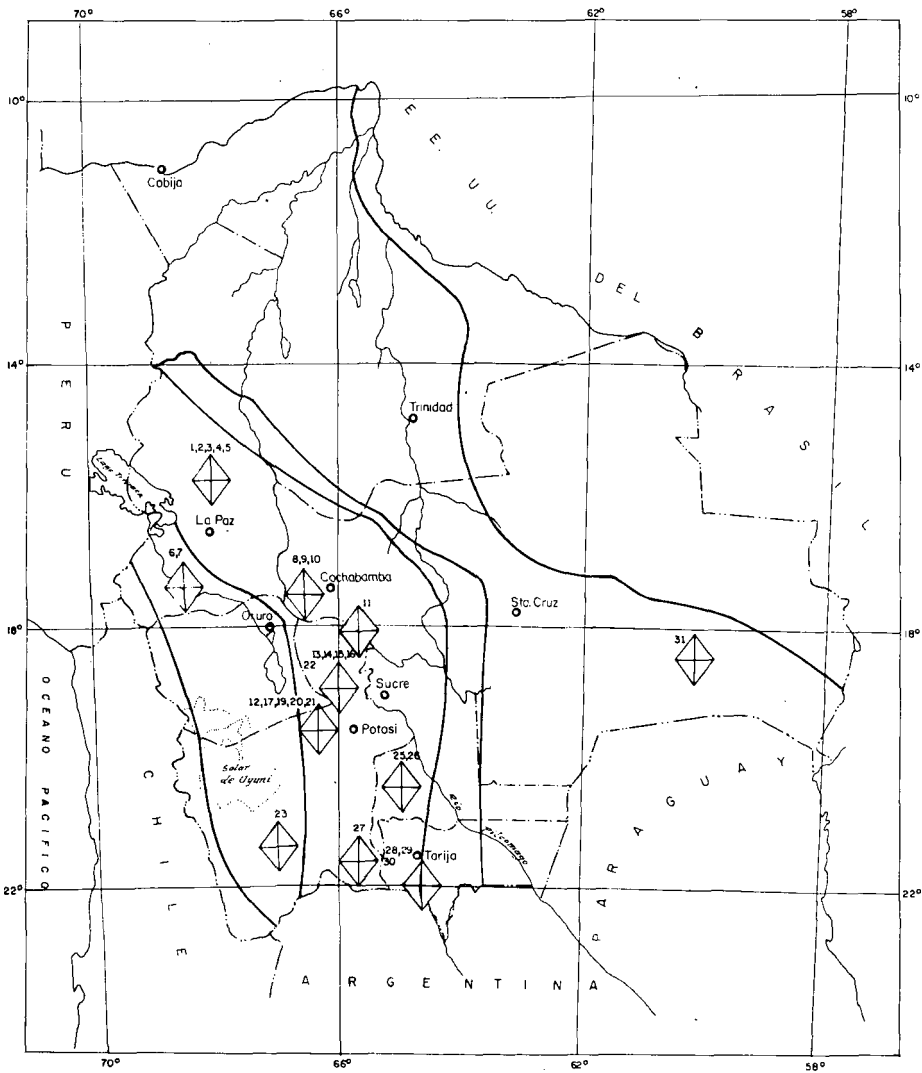
### 2.1. Modelo de cuenca sedimentaria o de cubierta

Se incluyen en este modelo cuerpos sedimentarios vulcanoclásticos de extensión regional, susceptibles de alojar minerales de uranio o de otro tipo; cuerpos discordantes como “rolls”, “stocks” y piroclastos (ignimbritas y efusivos intercalados con sedimentos), es decir toda acumulación metalogénica situada por encima de la discordancia regional que separa el zócalo de la cubierta.

### 2.2. Modelo de zócalo

Se incluyen en este modelo todos los elementos y unidades geológicas que se ubican estratigráficamente por debajo de los rellenos sedimentarios o vulcanoclásticos. Los modelos de zócalo pueden ser: filonianos, de impregnación stockwerks, pórfidos uraníferos, pegmatitas etc.

Las anomalías trabajadas por AGIP URANIUM LTDA. en sus cuatro zonas de exploración uranífera (Chacarilla – Corocoro, Los Lípez, Tarija – Tupiza y Roboré), salvo las de Rejara y Mecoya (Tarija) – modelo de zócalo – corresponden todas al modelo de cuenca sedimentaria o de cubierta.



INDICIOS

- |                  |   |                                |                            |   |                          |              |   |                         |
|------------------|---|--------------------------------|----------------------------|---|--------------------------|--------------|---|-------------------------|
| GRUPO LA PAZ     | { | 1. LUNLAYA, KOHUILA            | DISTRITO LOS FRAILES OESTE | { | 12. MINA AMISTAD         | GRUPO LIPEZ  | { | 23. POLULOS - CERRILLOS |
|                  |   | 2. MILLIPAYA, MINA INCOGNITA   |                            |   | 13. TORKO                |              |   | 24. OLLAGUE             |
| GRUPO COCHABAMBA | { | 3. TIPUANI                     | DISTRITO LOS FRAILES ESTE  | { | 14. CUCHUTA              | GRUPO TARIJA | { | 25. PADCOYO             |
|                  |   | 4. BOLSA NEGRA                 |                            |   | 15. COTAJE               |              |   | 26. CAMARGO             |
|                  |   | 5. URANIA                      |                            |   | 16. COROMA - RIO MARQUEZ |              |   | 27. TUPIZA (ESPAÑOLA)   |
|                  |   | 6. COROCORO                    |                            |   | 17. CHITA                |              |   | 28. REJARA - CAÑAS      |
|                  |   | 7. CHACARILLA                  |                            |   | 18. LLALLAGUA - SIGLO XX |              |   | 29. MECOYA              |
|                  |   | 8. SAN CRISTOBAL Y SAPO        |                            |   | 19. YARHUICOYA           |              |   | 30. AMBOROZÚ            |
|                  |   | 9. PAROTANI - RAMADA - CHOROMA |                            |   | 20. ESPERANZA            |              |   | 31. ROBORE              |
|                  |   | 10. ARQUE                      |                            |   | 21. CHULLCHUCANI         |              |   |                         |
|                  |   | 11. TORO TORO - LA VIÑA        |                            |   | 22. TOLLOJCHI            |              |   |                         |

FIG.2. Mapa de indicios uraníferos.

AGIP concentró pues sus esfuerzos en las formaciones terciarias continentales, por sus condiciones de yacencia, presencia de materia orgánica y la naturaleza de los sedimentos. De esta manera se seleccionaron las formaciones: Kollu Kollu (Oligoceno), en el área de Corocoro; Potoco (Eoceno), en el área de Los López; Guandacay (Mioplioceno), en el área de Tarija. También exploraron el grupo Jacadigo de probable edad ordovícica, en San José de Chiquitos y las lavas terciarias en Tupiza [1].

En cambio, COBOEN tiene sus zonas de interés en la Cordillera Oriental, que participan tanto del modelo de cubierta como de zócalo. Así, en los sinclinales del Caine y Camargo, se tienen indicios uraníferos en areniscas calcáreas, calizas nodulares oolíticas del Cretácico en El Molino (Campaniano), correspondientes al modelo de cuenca sedimentaria o de cubierta.

En los indicios de San Cristóbal y Sapo, Ura Huayco, Padcoyo y Yauricoya, se tienen modelos de zócalo, ya que la mineralización uranífera se emplaza en rocas paleozoicas (Ordovícico no diferenciado) afectadas por la orogénesis hercínica y, en algunos casos, intruídas por granitos y sienitas nefelínicas.

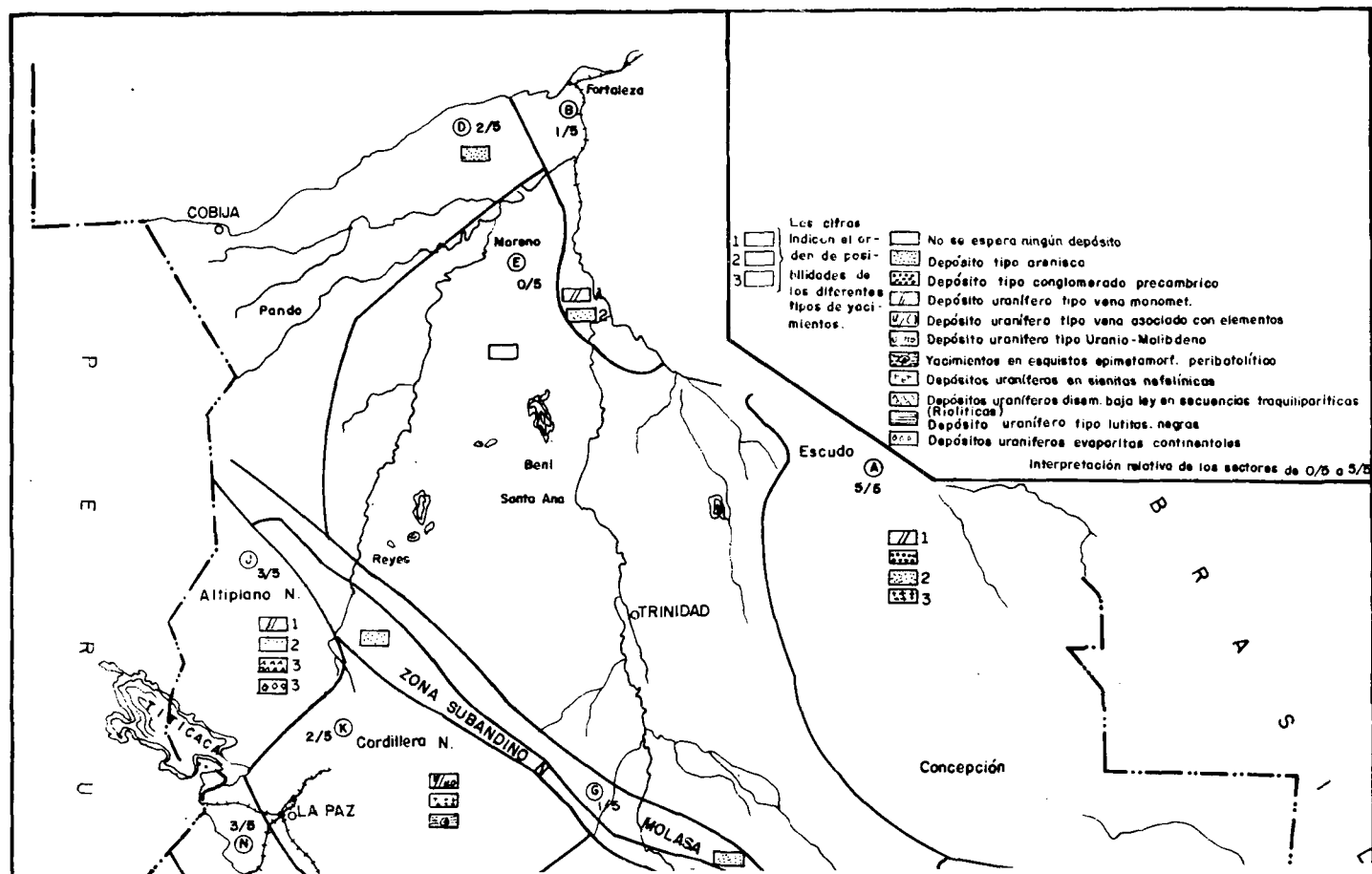
En el borde oeste de la Cordillera Oriental se observa que los indicios uraníferos están asociados al plutonismo (intrusiones) y vulcanismo andinos (efusivos y piroclastitas), en asociación con estaño wolfram en los indicios de Charazani, Bolsa Negra, La Urania; más al sur, en asociaciones uranio-molibdeno, en la Cordillera de los Frailes.

Estos indicios participan del modelo de cubierta y de zócalo, a veces mixto, en los casos de mineralizaciones peribatolíticas, donde el Paleozoico es intruido por rocas graníticas que en su contacto forman eventualmente aureolas de enriquecimiento secundario.

### 3. EVALUACION DE ZONAS URANIFERAS POSIBLES

La Fig. 3 indica las zonas favorables posibles para la prospección uranífera en Bolivia, y se basa en los siguientes estudios:

- Condiciones de favorabilidad receptiva de las rocas (lito-estratigráficas), en base a los siguientes documentos: “Mapa Geológico de Bolivia” [2]; “Mapa Resumen de la Geología Petrolera de Bolivia” [3], de los cuales se extrajeron los ambientes sedimentarios y columnas estratigráficas del Subandino y del Altiplano.
- Análisis de los ciclos orogénicos en Bolivia, ciclo Precámbrico-Hercínico y Andino, extraídos del “Mapa Tectónico de Bolivia” [4].
- Estudio de las asociaciones mineralógicas compatibles e incompatibles con el uranio, en base a experiencia de trabajos de prospección y “Mapa de los Yacimientos Minerales de Bolivia” [5].
- “Rapport de mission en Bolivie” [6]. “Informe sobre Favorabilidad de Areas y Recomendaciones sobre los Prospectos del Sector de los Frailes” [7].





#### 4. CLASIFICACION DE LA PROSPECCION

La clasificación de los sectores y ambientes de prospección se realiza en base a las seis unidades morfoestructurales que presenta el país.

##### 4.1. Unidad morfoestructural Escudo Brasileño

(Parte boliviana: 162 125 km<sup>2</sup> aprox.)

##### 4.1.1. Sector (A) Chiquitano-Petas-Sunsás

Corresponden al Precámbrico 3 unidades litológicas aflorantes en el extremo oriental del país: a) Complejo cristalino Chiquitano, b) Formación Petas y c) Formación Sunsás.

El "Complejo cristalino Chiquitano" es el de mayor desarrollo y extensión; aflora en la parte oriental de los departamentos de Pando, Beni y Santa Cruz, describiendo un arco de convergencia hacia el NE, desde la latitud de Cachuela Esperanza, sobre el río Madre de Dios en el extremo norte, hasta San Matías — La Gaiba, en el extremo SE.

Esta unidad está conformada por granitos, granitos magmáticos, granodioritas y microgranitos de colores rosados, grises y amarillos claros con tonos verdosos que pueden ser atribuidos al Proterozoico más antiguo. En discordancia sobre la anterior y a modo de "manchas" de aspecto y extensión irregular, se desarrolla una serie de "metasedimentos" denominada "Formación Petas" (Oviedo-Pareja, 1975), constituida principalmente por gneises, esquistos y micaesquistos tectónicamente muy deformados. En los alrededores de Santo Corazón (Río del Cajón), estas rocas alcanzan alrededor de 490 m de potencia.

En discordancia angular sobre las anteriores, se desarrolla otra unidad que se puede atribuir al Proterozoico más tardío, la "Formación Sunsás", que está formada por gruesos bancos de ortocuarcitas rosadas y areniscas parduscas, con delgadas intercalaciones de limolitas gris-violadas. El conjunto sobrepasa los 1600 m de espesor y forma las principales serranías que se desarrollan sobre la gran masa cristalino-metamórfica (Serranía Huanchaca), equivalente a la Formación Aguapey (Brasil).

Por la posibilidad de existencia de conglomerados oligomícticos fértiles en uranio (tipo Canadá, Africa, Brasil) y por el conocimiento de los trabajos del "Proyecto Precámbrico" (se sabe que en San Ignacio de Velasco, al norte del paralelo 16, existen granitos alcalinos intruídos por complejos anulares de sienitas con cuerpos carbonáticos, tipo Groenlandia, Poços de Caldas — Brasil), aumenta la favorabilidad prospectiva en este sector; y si éste se revela uranífero, se espera encontrar eventualmente los siguientes tipos de yacimientos, por orden de prioridad:

- Yacimientos de uranio de tipo filoniano, monometálicos, asociados a otros elementos.

- Yacimientos de uranio en sedimentos detríticos arcillosos, continentales, en cuencas intra-cratónicas o peri-cratónicas del Escudo.
- Yacimientos de uranio, asociados a intrusiones de cuerpos sienítico-carbonáticos.

En la parte occidental del Escudo se consideraron dos sectores: al noreste el de Guayaramerín-Riberalta y al sudeste el de las Serranías Orientales.

#### *4.1.2. Sector (B) Guayaramerín-Riberalta*

Este sector es una extensión noreste del Escudo Brasileño, donde sus afloramientos son numerosos, indicándose areniscas arcóscas de edad probablemente precámbrica. Los probables yacimientos de uranio a encontrarse en este sector serían del tipo filoniano polimetálico, o asociado a areniscas continentales.

#### *4.1.3. Sector (C) Serranías Orientales*

Se sabe que este sector está constituido por formaciones precámbricas, paleozoicas, cretácicas y terciarias, donde la mayor parte de los terrenos de edad fanerozoica son del tipo continental detrítico. A partir del Paleozoico, estas formaciones tienen el Escudo Brasileño como zona de aporte principal.

Entre la línea férrea y el Escudo se observan emanaciones de gas, factor favorable suplementario que crea las condiciones óptimas para encontrar yacimientos uraníferos de tipo arenoso. Por otro lado, es posible que mineralizaciones del tipo filoniano estén en relación con el zócalo, posibilidad reducida, debido a que los afloramientos en el sector son muy escasos.

COBOEN, a través de su contratista AGIP URANIUM LTDA., trabajó en esta zona (Roboré — San José de Chiquitos).

En al sector que corresponde a las llanuras Chaco-benianas, sectores (F) y (E) respectivamente, se añade el sector (D), que corresponde al Departamento de Pando en su integridad.

#### *4.1.4. Sector (D) Pando*

El Terciario continental, cuya fuente de aporte parece ser el Escudo, aflora inmediatamente debajo de la cobertura vegetal, creando un ambiente geológico favorable para detectar yacimientos uraníferos de tipo sedimentario.

### **4.2. Unidad morfoestructural Llanura Chaco-beniana (500.812 km<sup>2</sup> aprox.)**

#### *4.2.1. Sector (E) Llanuras del Beni*

El recubrimiento cuaternario es prácticamente continuo y espeso. Las formaciones de interés del Escudo están recubiertas; es de interés la zona donde el Terciario interviene entre el zócalo y el Cuaternario.

#### 4.2.2. Sector (F) Llanuras del Chaco

Este sector está cubierto por Cuaternario, el mismo que camufla al Paleozoico, Mesozoico y partes del Terciario.

La posibilidad de la ausencia de la capa acuífera entre la cobertura del Paleomesozoico y el Cuaternario, haría eficaz la prospección mediante "track-each" o emanometría por uranio.

Se puede esperar encontrar debajo del recubrimiento cuaternario depósitos uraníferos del tipo arenisca, asociados a la cobertura continental del zócalo (Carbonífero continental, tipo Gondwana).

La existencia de emanaciones gaseosas en la parte central del sector, así como la producción de petróleo son favorables, puesto que se pueden aprovechar los pozos de perforación para realizar registros gamma.

Considerando esta cuenca como zona de recepción de sedimentos del Escudo, las llanuras del Chaco representan zonas favorables para la prospección de uranio.

#### 4.3. Unidad morfoestructural Zona Subandina (88.562 km<sup>2</sup> aprox.)

La faja subandina está comprendida entre el bloque andino por el oeste y la Llanura Chaco-beniana por el este, bordeando el extremo oriental de los Andes.

Desde el punto de vista geomorfológico, comprende una zona de montañas de plegamiento, cortadas transversalmente por ríos antecedentes en una etapa juvenil de erosión.

Morfoestructuralmente, corresponde a lo que en rigor debería llamarse Pre-andino; se halla conformada por alineamientos de serranías paralelas entre sí, de dirección norte-sur, en el sector comprendido entre la frontera argentina y Santa Cruz y de esta localidad hasta la frontera peruana, con una dirección noroeste-sudeste.

Las serranías coinciden con grandes alineamientos en anticlinal, alargados, asimétricos, afectados por fallas de empuje inversas, de inclinación predominantemente al oeste [3].

Por algunas características tectónico-estratigráficas y por razones de trabajo, se subdivide en tres sectores: Peri-andino o marginal, Subandino norte y Subandino sur.

##### 4.3.1. Sector (G) Peri-andino

Entre el Subandino propiamente dicho y la llanura Chaco-beniana se extiende una delgada faja de pie de monte con relieve topográfico moderado, cuyas características estructurales son más amplias que en el Subandino y la Llanura; su mayor parte se ve afectada por una falla frontal de poco rechazo que se desarrolla paralelamente al eje de estructura [3].

Este sector está representado esencialmente por sedimentos continentales, como conglomerados no plegados pero fallados, los mismos que los formados por aportes sedimentarios de la Cordillera Oriental, donde la cuenca se hace más profunda del sur hacia el norte.

Se espera encontrar en este sector uranio asociado a sedimentos continentales de tipo molasa (Permo-Carbonífero, tipo Gondwana), especialmente en la parte del codo de Santa Cruz. Recientemente se han hecho hallazgos importantes de yacimientos de uranio en la región de Porto Alegre (Brasil), en este ambiente.

#### 4.3.2. *Sector (H) Subandino norte*

La faja subandina del norte se extiende desde la frontera peruana hasta el río de Yapacaní. Los núcleos de los anticlinales se hallan conformados por rocas principalmente cretácicas y terciarias. En la parte meridional del Subandino norte, las fallas inversas y la litificación son más predominantes, por lo que las estructuras son menos definidas.

Desde el río Yapacaní hasta la frontera peruana se halla expuesta una gruesa serie de sedimentitas, predominantemente psefítico-pelíticas, correspondientes a las secciones (5) y (6) de Prada [3], en el flanco nor-occidental de la serranía de Caquiahua (?), entre los ríos Madera y Tarena.

Revisada la estratigrafía del Subandino norte [3], se observa que las formaciones Charqui y Tutumo (Plioceno) con discordancias, son ampliamente favorables para la prospección de uranio. Se trata de una sección desarrollada en el núcleo de los sinclinales, en la serranía de Charqui sobre la margen derecha del río Beni, a 33 km aguas arriba de la localidad de Rurrenabaque [3].

Desde el punto de vista de la geología del uranio, se espera encontrar en estos ambientes yacimientos continentales en areniscas y conglomerados, asociados a troncos carbonizados del Terciario, Cretácico y Permo-carbonífero.

En el mismo Subandino norte, al noreste de Cochabamba, sobre las cabeceras del río Espíritu Santo, se observan algunos afloramientos del Precámbrico, favorables para la prospección [5].

#### 4.3.3. *Sector (I) Subandino sur*

La faja subandina del sur se sitúa entre el río Yapacaní y la frontera argentina. En los núcleos de los anticlinales también afloran rocas permo-carboníferas y devónicas. Excepcionalmente, existen estructuras en cuyos núcleos afloran rocas más jóvenes.

Revisada la estratigrafía del Subandino sur [3], nos interesa el Carbonífero continental y el Terciario, habiéndose ya detectado anomalías importantes en la Angostura (camino Cochabamba – Santa Cruz) y en Charagua, en rocas permo-carboníferas (Escarpment – Tarija, Tupambi).

Entre las formaciones carboníferas importantes citemos: Tupambi (Namuriano), Taiguati (Westfaliano), Escarpment y San Telmo (Stefaniano). Según la estratigrafía de las formaciones indicadas, es factible encontrar conglomerados oligomícticos, los cuales representan áreas fértiles para la prospección de uranio (Canadá, Africa).

Del Terciario, interesarían las formaciones Petaca (Oligoceno), Guandacay y Tutumo (Plioceno), por tratarse de areniscas conglomerádicas mal seleccionadas, con presencia de intra-discordancias.

En la formación Guandacay, al sudeste de Tarija, COBOEN posee un gran número de anomalías en una faja de 20 km de largo por 5 de ancho.

En esta zona del Carbonífero superior al Cretácico, la sedimentación es de tipo Gondwana, muy poco volcánica. El Cretácico es continental en sus dos terceras partes, pero hacia el norte pasa gradualmente a una facies marina.

Se puede especular con la existencia de un nivel estratigráfico que mundialmente es favorable para la prospección uranífera; se trata del Permo-carbonífero, pero aquí la facies no parece ser la más propicia. Solo podemos apoyar la favorabilidad en base al carácter litológico de la cubierta post-hercínica y al tipo de plegamiento y fallamiento propicio para la penetración y entrapamiento de soluciones uraníferas.

Esta misma conjunción de elementos geológicos ha originado la mineralización del sinclinal de Tonco-Amblayo (Salta, Argentina), con mineralización de tipo singenético o epigenético, derivada de intrusivos y alojada concordantemente en la cubierta cretácica-terciaria (neocretácica de Salta).

#### **4.4. Unidad morfoestructural Cordillera Oriental (184.875 km<sup>2</sup> aprox.)**

Esta unidad estructural se diferencia de la faja subandina en que presenta marcada inversión en el relieve, puesto que los sinclinales se hallan conformando los altos topográficos y los anticlinales forman depresiones y valles topográficos.

Revisado el Mapa tectónico de Bolivia [4], se observa que la cadena hercínica está ampliamente desarrollada en la Cordillera Oriental, distinguiéndose en esta unidad terrenos del Paleozoico inferior ( $V_1$ ), afectados por la tectónica eohercínica (post-Devónico a pre-Carbonífero) y terrenos del Paleozoico superior ( $V_2$ ), afectados por la tectónica tardihercínica (Carbonífero a Pérmico medio).

La actividad magmática del ciclo andino está representada por la cadena de plutones de la Cordillera Real, agrupados bajo el título de granitos andinos sin diferenciación.

El revestimiento meso-cenozoico de la plataforma hercínica está constituido por sedimentos típicos de cuencas intramontanas. Dos fases tectónicas afectaron sucesivamente a todo este conjunto y así es posible diferenciar en el ciclo andino:

- Terrenos conformados por capas rojas de edad cretácica eocena superior que fueron plegados por una fase pre-oligocena a oligocena inferior.

- Terrenos volcánicos, vulcano-detríticos de edad oligocena inferior a pliocena, que fueron afectados durante el Plioceno por dos fases de deformación (TA 2 la primera fase y TA'2, la segunda).

Para mejor estudio de la geología del uranio de esta unidad, se la subdivide en tres sectores:

#### 4.4.1. Sector (J) Altiplano Norte

Este sector comprende la extremidad norte de la Cordillera de Muñecas y la terminación del Altiplano, formando en conjunto un paisaje de montaña y de meseta.

El sector participa en terrenos del Paleozoico inferior y superior ( $V_1 - V_2$ ), de granitos andinos ( $A_y$ ). Terrenos paleozoicos ( $V_3$ ) posteriores al Pérmico medio, considerados como post-tectónicos, bien conocidos en el Perú, existirían en Bolivia cerca de la frontera con ese país (norte del lago Titicaca) además de terrenos volcánicos y escasos conglomerados.

Desde el punto de vista de la geología del uranio, interesaría el Carbonífero del norte del lago Titicaca, formado por lutitas y rocas clásticas con capas irregulares de carbón intercaladas con 3 horizontes de areniscas arcósicas muy feldespáticas, poco consolidadas y potentes, con 4 a 6 niveles de tilitas. La porosidad es favorable y se observa el paso de soluciones.

También interesaría el contexto de rocas intrusivas y extrusivas presentes en la zona, ya que algunas de ellas se muestran fértiles en uranio, como se observa en los indicios de Lunlaya – Cohuila en la localidad de Charazani (Cordillera de Muñecas), en posible asociación metalogenética wolfram-estaño-uranio.

Eventualmente se espera encontrar los siguientes yacimientos uraníferos en este sector:

- Yacimientos filonianos en contexto polimetálico o no, en relación con rocas intrusivas.
- Yacimientos de tipo arenisca en formaciones continentales (Carbonífero y Cretácico).
- En volcanitos de carácter ácido de la Cordillera o el Altiplano.
- Depósitos asociados a evaporitas continentales y calizas.

#### 4.4.2. Sector (K) Cordillera Norte

Este sector está constituido también por terrenos del Paleozoico inferior y superior, plegados por la orogénesis eo y tardi-hercínica.

Las intrusiones juegan un papel importante y están constituidas por granitos hercínicos sintectónicos ( $V_y$ ) (Yani – Zongo?) y granitos andinos ( $A_y$ ).

La Cordillera Real estaría constituida de batolitos del Permo-triásico al Jurásico y la Cordillera de Tres Cruces de granitos y monzonitas del Terciario medio a superior (Oligoceno-Mioceno)

En la Cordillera Real se pueden definir de norte a sur las siguientes unidades:

- Batolito de Sorata, con 50 km de largo desde el Illampu hasta el río Challana y una superficie aproximada de 350 km<sup>2</sup>. Este cuerpo está separado del de Yani (probablemente Pérmico), muy favorable para la prospección de uranio, por presentar una faja metamorizada de 3 a 4 km hacia el este.
- Batolito de Chucura (Huayna Potosí y Aillco)
- Taquesi – Mururata, al sur del abra de los Yungas. En sus faldas occidentales se tiene la mina de Bolsa Negra, donde COBOEN tiene un indicio uranífero.
- Illimani, de 6 km aproximadamente de largo y desplazado hacia el oeste de la línea de intrusiones. En sus faldas se encuentra la mina “La Urania”, con un importante indicio de COBOEN.

Al noroeste de Cochabamba se observan sienitas nefelínicas atectónicas en el cerro San Cristóbal y Sapo (provincia Ayopaya), que jalonan el codo Arica – Amboró. En este sector, COBOEN tiene indicios uraníferos en sienitas nefelínicas. Un poco más al sur, al noreste de Tapacarí, se tiene un indicio uranífero con típica asociación níquel-uranio (Ura Huayco). Más al noreste de Tapacarí, en la región de Ushpa Ushpa, se tiene conocimiento de la presencia de hierro y baritina, favorables para la prospección de uranio [2].

En este sector se espera encontrar la siguiente asociación uranífera:

- Uranio de tipo filoniano polimetálico o no, asociado a intrusiones (La Urania, Bolsa Negra).
- Uranio dentro de sienitas nefelínicas (cerro Sapo y San Cristóbal).
- Finalmente, la presencia de granitoides intruyendo esquistos poco metamorizados del Paleozoico inferior puede producir uranio de tipo peri-batolítico (Nisa – Portugal – España).

#### 4.4.3. Sector (L) Cordillera Sur

Se ha subdividido este sector en dos sub-sectores, a saber:

##### 4.4.3.1. Subsector (L<sub>a</sub>)

Está constituido por terrenos del Paleozoico superior e inferior (V<sub>1</sub>) (V<sub>2</sub>), plegados por las fases eo y tardihercínicas (Cámbrico? hasta Devónico superior y Pérmico medio). También se observan capas rojas del Cretácico superior (Eoceno),

afectadas por la fase de plegamiento ante (intra) oligoceno inferior y areniscas terciarias en estructuras en sinclinal (Caine – Chaupicocha – Camargo).

COBOEN tiene un indicio en el sinclinal de Caine – Toro Toro (Cochabamba) y otro en sedimentos ordovícicos en la localidad de Padcoyo (San Lucas – Chuquisaca). En el sinclinal de Camargo, en calizas nodulares oolíticas del Cretácico Molino (Campaniano).

El Cretácico medio a alto (Cenomaniano – Turoniano) presenta unidades litológicas de excelente calidad receptiva (areniscas deltaíco-playeras, de Toro Toro) y tipo Tonco Amblayo (Salta, Argentina), donde se tienen yacimientos de uranio en el grupo Yacoraite, asociados a un cuerpo de granito fértil de la pre-cordillera.

En la zona de Padcoyo, se intercalan pantallas activas de diabasas en sedimentos afectados por la orogénesis hercínica (peneplanicie).

#### 4.4.3.2. Subsector (L<sub>b</sub>)

Este sector está representado en la parte sur de Bolivia (Tarija), cerca de la frontera con la Argentina, por núcleos precámbricos constituidos por gneises, esquistos y granitoides (P<sub>xv</sub>), los cuales fueron retomados en los plegamientos hercínicos y andinos.

COBOEN trabajó en este sector (Rejara – Mecoya), en base a rodados del Precámbrico, radiactivos, los mismos que en la Argentina contienen mineralización uranífera [1].

Se observan también terrenos del Paleozoico inferior (Ordovícico) y algunos afloramientos del Paleozoico superior (V<sub>2</sub>).

Hacia el sudoeste del área se observan dacitas y andesitas de edad indeterminada.

En el sector de Tupiza, COBOEN tiene indicios uraníferos en lavas de composición intermedia (dacitas) [1].

En este sector se podrían encontrar los siguientes yacimientos uraníferos:

- Yacimientos de tipo areniscas continentales.
- Yacimientos filonianos o de impregnación, polimetálicos o no, por la presencia de intrusivos que atraviesan los esquistos del Paleozoico inferior (Ordovícico).
- Yacimientos en esquistos epimetamórficos (tipo Nisa).

#### 4.4.4. Sector (M) Los Frailes

La Formación Los Frailes se ha depositado sobre un paleorrelieve silúrico-ordovícico, terciario-cretácico que, fuera de ciertas zonas marginales de la Cordillera Oriental, ha sido previamente peneplanizado, alterando lo suficiente la superficie como para otorgar a la discordancia así formada (superficie puna) una importancia fundamental en la distribución del caudal uranífero aportado por las vulcanitas. Estas están constituidas por una intercalación de lavas, tobas

e ignimbritas de tipo riolítico, riodacítico y dacítico, con una edad de 7,5 a 6,7 millones de años (K–Ar).

En cuanto a los intrusivos, M. Ziegler concluye lo siguiente:

“Teniendo en cuenta el gran ascenso vertical (destape profundo) y el escaso metamorfismo evidenciado en el macizo andino juntamente con el carácter intrusivo del magmatismo, el grado geotérmico durante y después del tectonismo ha sido débil e incapaz de producir granitos anatóxicos de la corteza siálica, por ello no se encuentra en la Cordillera de los Andes Centrales, leucogranitos a dos micas, anatóxicos, frecuentes productores de uranio en Europa”.

Falta conocer la geocronología de los cuerpos intrusivos, su carácter magmático, petrológico y sus facies (profunda, media, superficial).

Este sector es el más conocido y trabajado por COBOEN, ya que en él se encuentran la mayor parte de los indicios uraníferos más importantes.

No se hacen mayores comentarios específicos, por cuanto existe un trabajo sobre la geología de este distrito que será presentado en esta Reunión.

Las expectativas de este sector en cuanto a mineralización uranífera son:

- Yacimientos de tipo areniscas en cuencas intramontanas.
- Yacimientos de uranio-molibdeno asociados a vulcanitas de carácter ácido.
- Yacimientos uraníferos diseminados, de baja ley, en rocas traquí-liparíticas-riolíticas asociadas a vulcanitas ácidas.
- Esquistos negros con diseminaciones de uranio de bajos tenores, en el paleorrelieve de Los Frailes, intruído por los granitos.

#### 4.5. Unidad morfoestructural Altiplano (116.500 km<sup>2</sup> aprox.)

##### 4.5.1. Sector (N) Altiplano Central

Este sector lo constituyen algunos afloramientos del Paleozoico inferior y superior ( $V_1$ ) ( $V_2$ ) situados al NE de Corocoro.

El sector lo constituyen capas rojas de edad cretácica a Eoceno superior ( $TA_1$ ), formando estructuras en anticlinal y sinclinal que fueron plegados por una fase tectónica del pre-Oligoceno a Oligoceno inferior e intruídos por algunos granitos de edad andina.

Comprende también terrenos volcánicos y vulcano-detriticos del Oligoceno inferior a Plioceno, que fueron afectados durante el Plioceno por dos fases de deformación ( $TA_2$  la primera y  $TA'_2$  la segunda).

Este sector comprende los ambientes de Tiahuanacu, la cuenca de Jesús de Machaca y el distrito cuprífero de Curahuara de Carangas.

Según la columna estratigráfica generalizada del Altiplano Norte, sector oriental [2], tendríamos los siguientes sistemas con sus respectivas formaciones:

- *Terciario*, con las formaciones: Rosapata, Caquiaviri, discordancia, Kollu Kollu, Coniri, discordancia, Tiahuanacu.
- *Cretácico*, con las formaciones: Santa Lucía, El Molino, Chaunaca, discordancia,
- *Carbonífero*, con formaciones no diferenciadas.

Las unidades más viejas se encuentran en la serranía de Tiahuanacu, en la localidad de Chilla y al norte de Jesús de Machaca, donde aflora el Carbonífero. En la localidad de Azafranal en el cerro de Chilla, se hallan expuestos también sedimentos del Cretácico superior.

El Carbonífero está constituido principalmente por conglomerados finos, cuarcitas y areniscas cuarzosas intercaladas con lutitas y limolitas, y en su tope mantiene discordancia angular fuerte con los sedimentos cretácicos y terciarios que suprayacen. Este sistema sería favorable para la prospección uranífera.

El sector participa de la faja cuprífera del Altiplano Central (Tiahuanacu, Chacarilla, Corocoro, Curahuara de Carangas), y COBOEN tiene indicios de uranio en las localidades de Corocoro (Cerro Kachaca) y en Chacarilla, asociados a yacimientos cupríferos tipo “red-bed” [1].

En este sector se pueden encontrar eventualmente las siguientes asociaciones uraníferas:

- Yacimientos uraníferos de tipo areniscas con asociación uranio-cobre (Formación Kollu Kollu).
- La presencia de intrusivos dacíticos y andesíticos y las fuertes anomalías en los filones cupro-uraníferos de Chacarilla hacen prever yacimientos volcánicos de carácter ácido, con asociación uranio-molibdeno (Formación Huayllamarca – Chacarilla).
- La presencia de evaporitas continentales denota posibles yacimientos de uranio en calizas.

#### 4.5.2. Sector (O) Salar de Uyuni

Se observan capas rosadas del Cretácico superior (TA<sub>1</sub>) y terrenos plio-cuaternarios (vulcanismo y cuencas lacustres recientes) afectados localmente por tectónica de fracturas.

Observando el mapa [2], se observa que el Salar contiene cloruro de sodio-boratos-carbonatos de sodio y potasio-bórax y algunas menas de cobre.

En este sector se puede encontrar eventualmente mineralización tipo uranio-molibdeno, asociada a stocks dacítico-andesíticos aflorantes en el sector.

Ligeramente al norte de Uyuni (Chita), a la altura del cerro Cuzco, COBOEN tiene una anomalía en terrenos terciario-cretácicos.

#### 4.5.3. Sector (P) Altiplano sur

Este sector está constituido por terrenos del Paleozoico superior ( $V_2$ ), capas rojas del Cretácico superior ( $TA_1$ ), capas rojas terciarias ( $TA_2$ ) y terrenos pliocenos afectados por la segunda fase del plegamiento ( $TA'_2$ ), y terrenos plio-cuaternarios (vulcanismo y cuencas lacustres recientes afectadas por fracturas –  $TA_3$ ).

La sucesión estratigráfica del Altiplano sur corresponde al:

- *Terciario*. Formaciones: Chocaya, discordancia, Julaca (Tambillo-Negrillos), discordancia, San Vicente, discordancia, Potoco, discordancia.
- *Cretácico*. Formaciones: Tusque, Candelaria, Pahua, Coroma, Mulasi, Orinoca, Anta, Lacaya, discordancia.
- *Devónico*. Formaciones: Catavi, Pampa (superior).
- *Silúrico*. Formaciones: Llallagua, Huanuni, Cancañiri (Zapla), discordancia.
- *Ordovícico*. Formaciones no diferenciadas (Serranía de las minas Cerrillos, San Vicente).

Este sector participa de la faja cuprífera sur (Cobrizos, Avaroa, Kolpani, Mesa Verde) y algunos yacimientos plumbo-ziníferos, argentíferos, antimoníferos, en la serranía de las minas [3].

En este sector COBOEN tiene indicios de uranio, y en él trabajó posteriormente la empresa contratista AGIP (Los López).

Se espera encontrar los siguientes tipos de yacimientos uraníferos:

- Yacimientos tipo uranio-molibdeno en vulcanitas ácidas.
- Yacimientos tipo areniscas continentales (formaciones Potoco y San Vicente).
- Yacimientos en asociación calcárea.

#### 4.6. Unidad morfoestructural Cordillera Occidental (23.375 km<sup>2</sup> aprox.)

Esta cordillera está cubierta por depósitos plio-cuaternarios (vulcanismo y cuencas recientes), afectados localmente por una tectónica de fracturas, existiendo volcanes apagados y en actividad fumarólica (volcán Putana – Ollagüe). La cadena volcánica la constituyen coladas de lava, cineritas, ignimbritas, tobas con ambiente andesítico, cuyos pies de monte forman pisos de terrazas que comportan evaporitas continentales.

La Cordillera Occidental no es una montaña de plegamiento, sino más bien el resultado de movimientos verticales, producto de un intenso vulcanismo de fines del Terciario y principios del Cuaternario.

Por razones de logística se divide esta unidad morfoestructural en dos sectores de prospección:

#### 4.6.1. Sector (Q) Cordillera Occidental Norte

En este sector se espera encontrar:

- Yacimientos uraníferos del tipo filoniano, polimetálico o no, asociados con intrusiones presentes en la zona.
- Yacimientos diseminados con bajos tenores, asociados a vulcanitas de carácter ácido.
- Mineralizaciones uraníferas asociadas a evaporitas continentales.

#### 4.6.2. Sector (R) Cordillera Occidental sur

Este sector está cubierto casi totalmente por Cuaternario, a través del cual emergen stocks dacíticos y con presencia de pequeños afloramientos del Paleozoico inferior.

Durante los trabajos de prospección efectuados por CONAMAR (PEGASO) en el sur del país, el informante detectó una anomalía radiactiva en “Lomas el Colorado”, en serranías Cañapa, al sudeste del volcán Ollagüe.

### 5. CLASIFICACION DE SECTORES

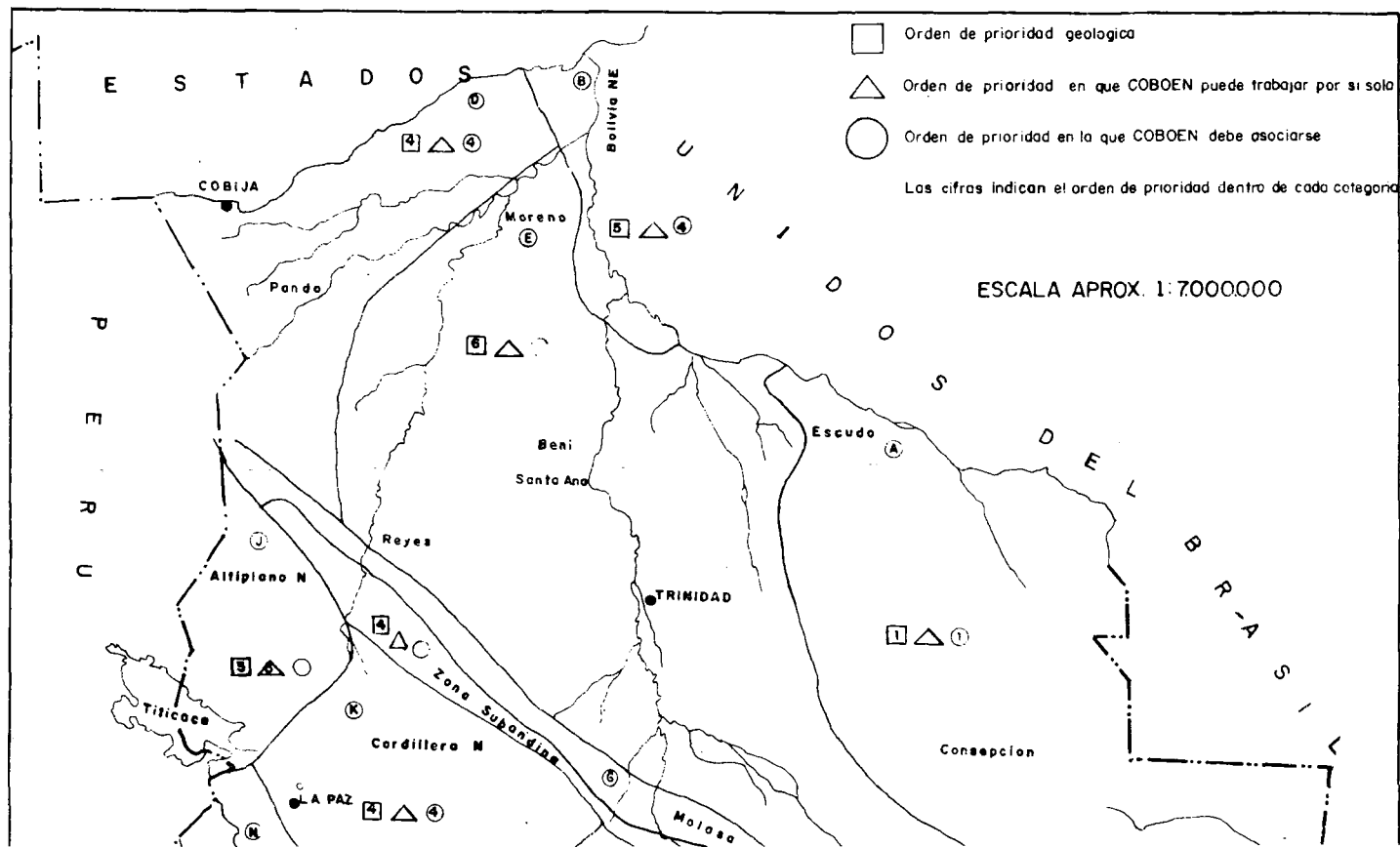
La Fig. 4 resulta de la combinación de los dos documentos precitados, y en ella aparece una triple clasificación de sectores:

- Por orden de prioridad puramente geológica.
- Por orden de prioridad dentro de la hipótesis de que COBOEN pueda trabajar por sí sola en zonas de fácil infraestructura y donde no se requieran inversiones fuertes.
- Por orden de prioridad dentro de la hipótesis de que COBOEN deba asociarse con terceros, a causa de las fuertes inversiones a efectuar, debiendo suscribir contratos de operaciones uraníferas del tipo “AGIP”, o contratos de asociación.

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del estudio de la favorabilidad de zonas por sectores para la búsqueda uranífera en Bolivia se desprende que las unidades o sectores de prospección más favorables con posibilidades eventuales están:

- en el sector del Escudo Brasileño (parte boliviana), en las cuencas intra y pericratónicas;



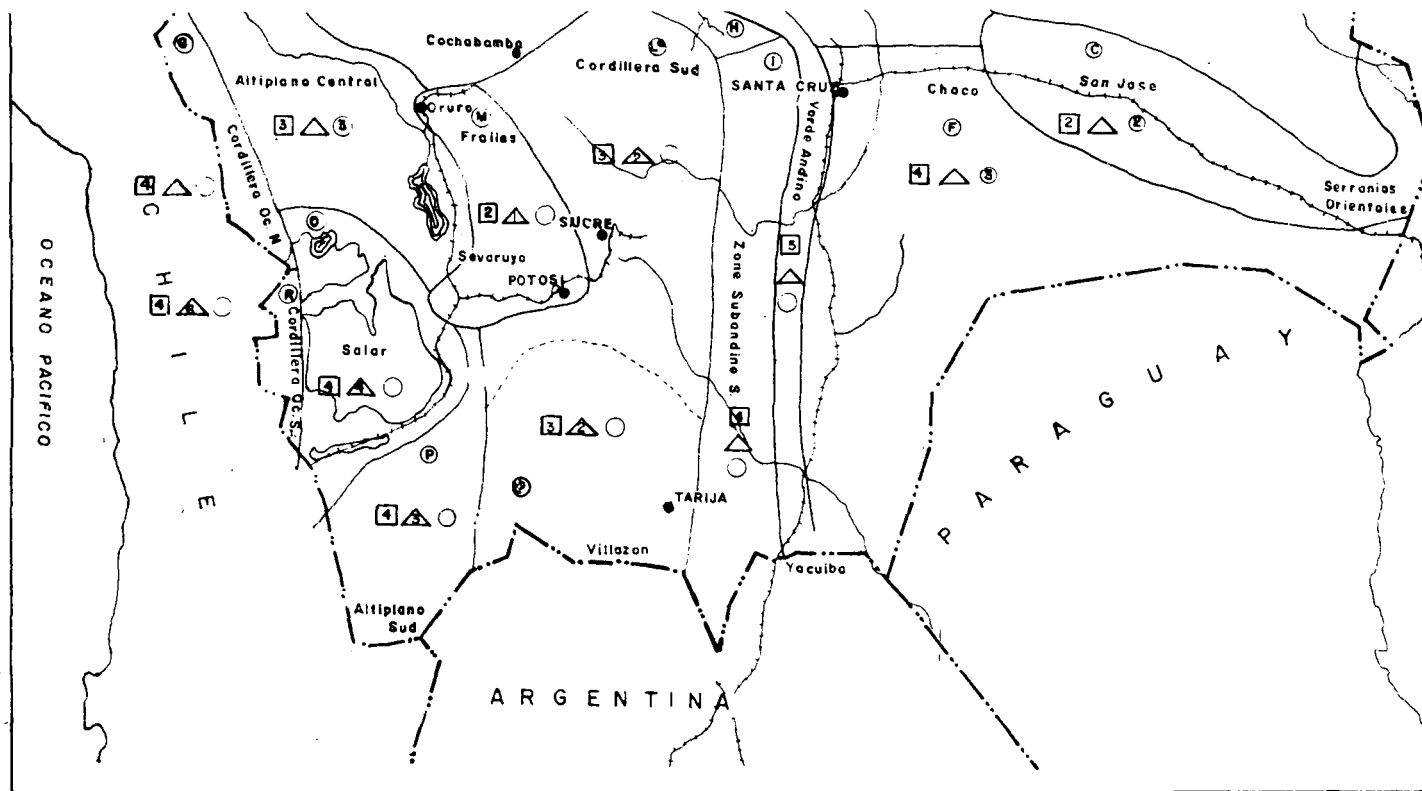


FIG. 4. Clasificación de sectores.

- en el Subandino, en las cuencas sedimentarias rellenas por rocas permo-carboníferas, cretácicas y terciarias;
- en la Cordillera Oriental, en cuencas sedimentarias o zócalos paleozoicos intruídos por granitos y/o afectados por vulcanismo de carácter ácido;
- en el Altiplano boliviano, estructuras sedimentarias afectadas por plutonismo y vulcanismo andinos.

## AGRADECIMIENTOS

Deseo testimoniar mi agradecimiento a M.V. Ziegler, del Commissariat à l'Energie Atomique de Francia (CEA), al Dr. Leonardo Branisa y al Ing. Victor Virreira, quienes cooperaron en el "Rapport de Mission en Bolivie", preparado por V. Ziegler, del cual se extrajeron 3 mapas y conceptos de interés para la elaboración del presente trabajo. Al Dr. Eduardo Rodríguez P., experto del OIEA en COBOEN (1978), miembro de la Comisión Nacional de Energía Atómica de la Argentina (CNEA), a los Dres. Luís Alberto Rodrigo y Arturo Castaños, quienes facilitaron información al Dr. Rodríguez para los trabajos de recomendación de zonas favorables en Bolivia (trabajo en borrador), del cual también se extrajeron valiosos conceptos. Y, por último, quiero agradecer a todos y cada uno de los ingenieros y técnicos del Departamento de Materias Primas de COBOEN su cooperación directa o indirecta en el presente trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] AGIP URANIUM LTDA., Informe final técnico-económico 1974-78, Contrato de operaciones COBOEN-AGIP, Bolivia.
- [2] COMIBOL-YPEB, Mapas geológicos de Bolivia 1963 y 1978.
- [3] PRADA, R.M., Resumen de la Geología Petrolera de Bolivia, Yacimientos Petrolíferos Fiscales de Bolivia (YPFB), La Paz (1961).
- [4] MARTINEZ, C., TOMASSI, P., BOTELLO, R., Mapa tectónico de Bolivia, UMSA, Geociencias, GEOBOL, Bolivia (1973).
- [5] COMIBOL, Mapa de los yacimientos minerales de Bolivia, 1952-77.
- [6] ZIEGLER, U., VIRREIRA, V., Informe de misión en Bolivia, CEA-COBOEN (1974).
- [7] RODRIGUEZ, E., Favorabilidad de áreas y recomendaciones de los prospectos del sector de Los Frailes, Informe en borrador, OIEA-COBOEN, La Paz (1978).

## DISCUSSION

A.E. BELLUCO: What area has so far been explored in Bolivia?

E. PARDO: Approximately 70 000 km<sup>2</sup>.

A.E. BELLUCO: The Charazani anomalies in the north of Bolivia close to the boundary with Peru, and the geological studies around Tarija in the south near

the Argentina border, show once again the necessity of having some system for exchanging regional results so that conclusions about the geological uranium favourability could be extrapolated beyond political boundaries.

E. PARDO: I agree with you. Since Bolivia lies in the middle of South America, its prospecting results can be extrapolated and stratigraphic correlations made with conditions in surrounding countries.

H.J. GOSO: What relation is there between the crystalline rocks in western Bolivia and the evolution in the Brazilian Tectonic Cycle described by Mr. Cordani?

E. PARDO: We do not have any data on this.

H.J. GOSO: What are the characteristics of the anomalies found in the Devonian?

E. PARDO: We did not find any anomalies in the Devonian rocks.

C. PREMOLI: Mr. Pardo, it strikes me that comparatively little emphasis has been put on the uranium potential of the cratonic areas of Bolivia. I am particularly intrigued by the Velasco alkaline province. Alkaline intrusions are good news in the southern part of the Brazilian Shield. I took a look at the LANDSAT expression of the Velasco complex and that cluster of ring structures reminds me very sharply of similar ring structures in Minas Gerais or Eastern Paraguay, where I worked extensively. In both Brazil and Paraguay some of these ring structures are associated with uranium mineralization. I wonder if this can be the situation in Eastern Bolivia. What I am suggesting is uranium of peralkaline or carbonatitic affiliation, possibly of Mesocenozoic age. Can you give us your views?

E. PARDO: According to the map showing the favourable areas and their order of priority, the Bolivian part of the Brazilian Shield is of primary geological importance. However, owing to the heavy investment that would be needed on account of its infrastructure problems, the Bolivian Nuclear Energy Commission (COBOEN) has not undertaken large-scale work in this sector. On the Precambrian project, it is known that to the north of the 16th parallel there are ring structures of alkaline rocks (of the type found at Poços de Caldas, Brazil) with thorium and uranium radioactivity.

J.E. MENDOZA: You mentioned the presence of torbernite and uraninite microgranules in the Guandacay Formation of the Tarija district associated mainly with fractures. I would like to ask what the fracturing system is and whether oxidation and reduction zones have been observed in the formation?

E. PARDO: The Tupiza area contains acidic vulcanites of an intermediate composition with torbernite mineralization and the presence of uraninite microgranules; this mineralization does not occur in the Guandacay Formation of the southern sub-Andean zone. The fracturation system is irregular and very chaotic.

P.M. BARRETTO: You indicated the sub-Andean zone as of interest for uranium exploration. This zone consists of three parts (the sub-Andean south,

central and north) and different facies. Is the entire sub-Andean zone of interest? What facies would be the most promising target for exploration?

E. PARDO: As far as we know, the Bolivian part of the sub-Andean zone is favourable for prospecting on all the Permo-Carboniferous (Gondwana-type) formations in its continental facies. COBOEN is carrying out large-scale prospecting in the Angostura and Charagua sector (southern sub-Andean zone).

# URANIUM EXPLORATION IN ECUADOR

B. SEVERNE

International Atomic Energy Agency,  
Vienna

P.F. PEÑAHERRERA, V.S. FIALLOS

Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica,  
Quito,  
Ecuador

## Abstract—Resumen

### URANIUM EXPLORATION IN ECUADOR.

The 600-km segment of the Andean Cordillera in Ecuador includes zones that can be correlated, geologically, with uranium districts elsewhere in the Andes. It is believed that these essentially unexplored zones have the potential for economic uranium mineralization. Exploration activity to date has been limited, although it has involved both geochemical and radiometric techniques to evaluate geological concepts. Minor uranium occurrences (with chemical analyses up to 100 ppm) have been encountered, which provide further incentive to commence large-scale systematic exploration. It is recognized that a very large exploration budget and considerable technical expertise will be required to ensure exploration success. Consequently, participation by groups of proven capability from other countries will be sought for Ecuador's national exploration programme.

### EXPLORACION DE URANIO EN EL ECUADOR.

El segmento de 600 kilómetros de la Cordillera Andina en el Ecuador comprende zonas correlacionables geológicamente con distritos uraníferos de otras partes de los Andes. Se cree que estas zonas prácticamente sin explorar poseen un potencial de mineralización económica del uranio. Hasta la fecha, las actividades de exploración han sido limitadas, aunque se han empleado técnicas geoquímicas y radiométricas para evaluar conceptos geológicos. Se han encontrado pequeñas manifestaciones de uranio (con análisis químicos de hasta 100 ppm), que constituyen otro incentivo para empezar una exploración sistemática en gran escala. Para que la exploración tenga éxito se precisan un presupuesto muy elevado y considerables servicios de expertos. En consecuencia, para el programa nacional de exploración en el Ecuador se tratará de conseguir la participación de grupos de capacidad demostrada procedentes de otros países.

## 1. INTRODUCTION

Ecuador is dominated by a 600-km segment of the Andean mountain chain which extends north-north-east and constitutes the high-altitude Sierra zone. It separates the Costa region to the west from the Oriente region in the east. These three geographic zones relate to the geological zones shown in Fig.1.

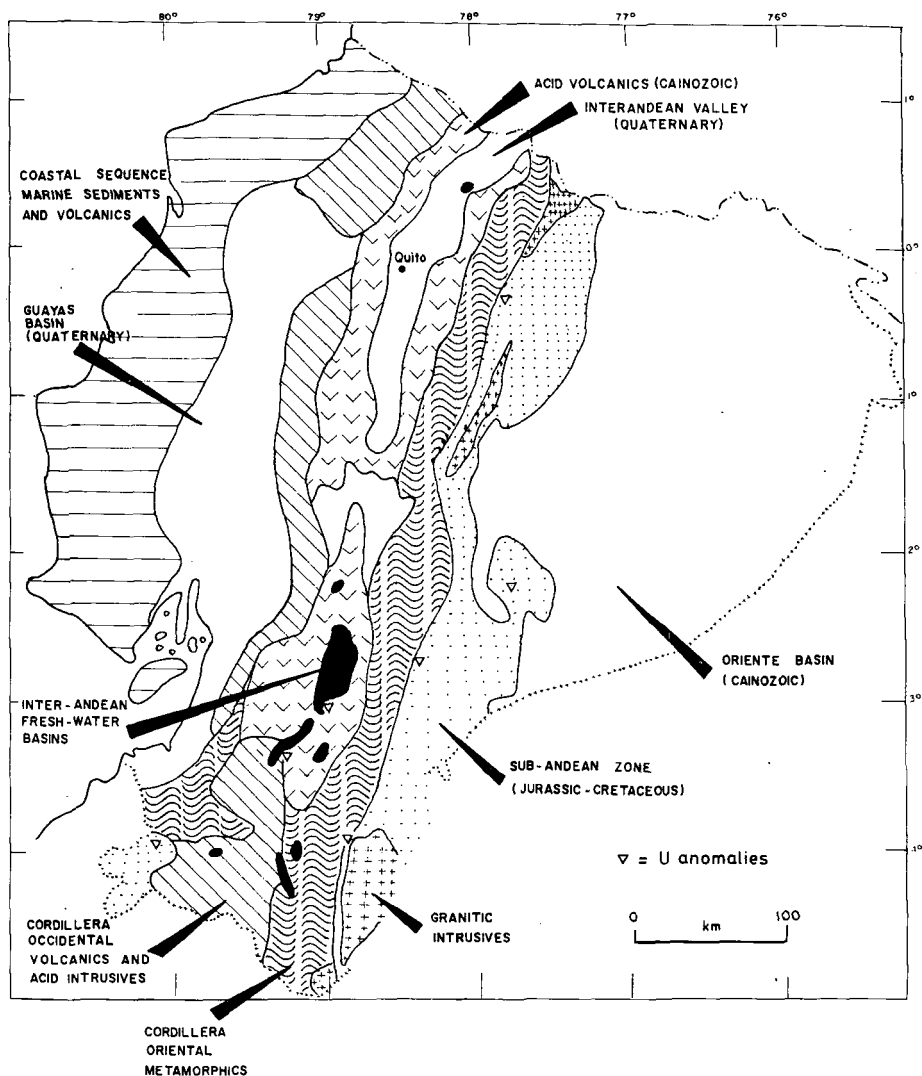


FIG.1. Geological map of Ecuador and uranium anomalies.

The Costa region comprises the Quaternary Guayas Basin and the coastal belt of Tertiary marine and lacustrine sediments, and Cretaceous volcanics.

The Sierra zone includes a western belt of Cretaceous marine volcanics, with some sediments and acid intrusives, an eastern belt of metamorphics (Cordillera Oriental), small Miocene freshwater basins, a capping of Cainozoic andesites and rhyolites and the Quaternary Interandean Valley.

The Oriente region is largely veneered by Quaternary sediments although in the Subandean zone Mesozoic sediments, volcanics and intrusives outcrop in domal structures.

Small outcrops of Palaeozoic or Proterozoic sediments occur in both the Sierra and the Oriente regions. In the Oriente region deep drilling has revealed the presence of Brazilian Shield rocks at depths of two or three kilometres.

Much of the geological information has been derived from successful exploration for oil in the Oriente, and oil and off-shore gas in the Costa regions. In the Sierra zone systematic mineral exploration and geological mapping have been carried out, with the aid of United Nations and United Kingdom government technical assistance programmes.

Energy resources in Ecuador currently include a significant hydro-potential, sufficient oil production for both domestic and export markets at current levels of local consumption, and potentially large gas reserves. However, an oil deficit is foreseen for the 1990s. Known coal reserves are small and of low quality.

Domestic consumption of electricity rose to 1640 GW·h in 1978, of which 67% was generated by thermal stations and 33% by hydro plants. Installed power amounted to 600 MW. While the hydro potential is apparently capable of meeting future increases in electricity demands, the geological characteristics of the country (seismic activity, dam-site geology) suggest that providing a broader electricity-generating base would be a more prudent solution.

It is believed that nuclear power stations will be required to assist in meeting the electricity requirements of the 1990s, and it is presently considered that a minimum nuclear fuel reserve of about 5000 t of uranium metal should be set aside for this need from future discoveries. Under the prevailing world market situation, uranium can also be a very attractive export commodity.

For these reasons, the Ecuadorian Atomic Energy Commission is preparing to evaluate the national uranium resources of Ecuador with a view to their economic exploitation. The International Atomic Energy Agency has to date made a significant contribution to the uranium investigations in Ecuador by providing uranium geologists for short-term assignments and the bulk of the total exploration budget (US \$200 000) applied over the past twelve years.

## 2. PREVIOUS EXPLORATION ACTIVITY (1966–1977)

Uranium exploration was initiated during 1966 by the International Atomic Energy Agency in association with the Ecuadorian Atomic Energy Commission. This six-month programme involved assessment of airborne scintillometric data, completion of a car-borne scintillometric survey along 3000 km of the national road network, and delineation of potentially favourable uranium zones [1].

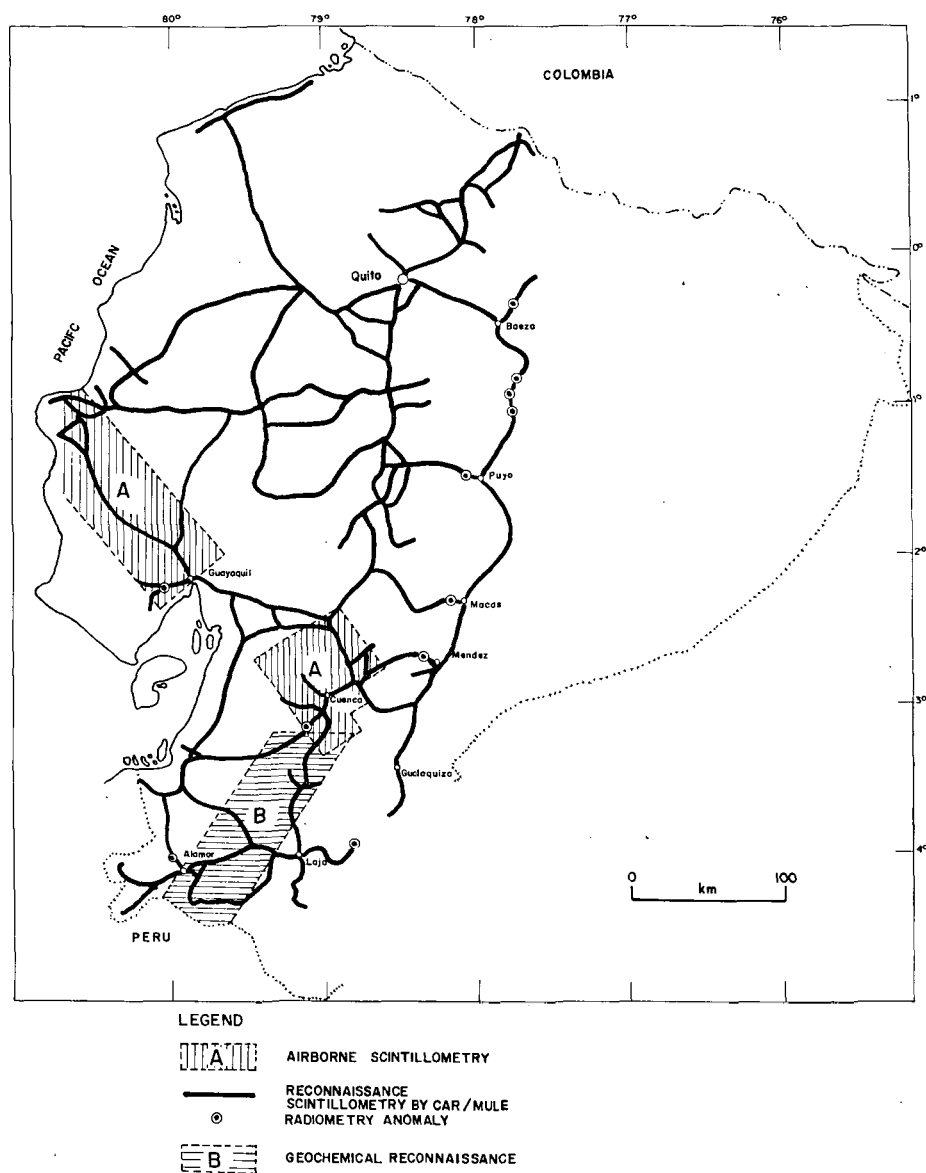


FIG.2. Uranium exploration (1966-1977).

The airborne scintillometry was obtained in the course of an aeromagnetics survey over 17 000 km<sup>2</sup> of the Sierra and Costa regions, as shown in Fig. 1. A relatively small detector assembly (crystal volume = 750 cm<sup>3</sup>) was flown at a height of 150 to 300 m and a velocity of around 120 knots (1 knot = 0.514 444 m/s). Some weak anomalies of dubious value were indicated in the survey records. However, one of these anomalies is located in Eocene sediments, 20 km west of Guayaquil (Fig. 2), and is considered worthy of evaluation.

Car-borne scintillometry was carried out with a small scintillometer (crystal volume = 40 cm<sup>3</sup>) at a survey speed of 20 km/h. This survey revealed many local anomalies and the strongest of these (100 to 120 counts/s) are shown in Fig. 2. Diverse geological units were indicated as being of interest, including mineralized granites, graphitic schists and Cretaceous sediments. The strongest radiometric response was obtained in carbonated sediments, 20 km south-west of Cuenca on the edge of a Miocene freshwater sedimentary basin.

However, it was recognized at this time, largely on the basis of studies in other sectors of the Andean Cordillera, that the most favourable zone for uranium mineralization occurs on or below the eastern slopes of the Cordillera Oriental. Unfortunately, this area could not be examined during 1966–1967 because of the lack of access to this zone of rugged topography and dense subtropical forest.

During 1968 the Ecuador Atomic Energy Commission extended the ground scintillometry survey to include a total of 7000 km along roads and muletracks. Several anomalies were located in the foothills east of the Cordillera Oriental and served to focus attention on the Cretaceous sediments in both the Oriente and the southern Sierra regions.

At the same time evaluation of Anomaly 44 near Cuenca was carried out by trenching, which indicated the very limited extent of this uranium occurrence, with analyses on grab samples averaging 30 ppm of uranium but also ranging up to 400 ppm [2].

In 1974 some 4200 geochemical samples (stream sediments) were made available from a previous United Nations mineral exploration programme [3], which was aimed at locating porphyry copper deposits within an area of 8200 km<sup>2</sup> in the southern Sierra.

The area is composed largely of Cretaceous andesites and acid intrusives, with smaller areas of Tertiary rhyolites and freshwater sediments. Some coincident geochemical response (copper-molybdenum) was obtained, leading to the location of several sub-economic zones of porphyry-copper-type mineralization.

Fluorimetric uranium analyses were carried out from 1974 to 1977 by the National Polytechnic School in Quito, using a hot 2.5N nitric acid extract of minus 80 mesh clastic sediment. Interpretation of this data was carried out during 1977 [4].

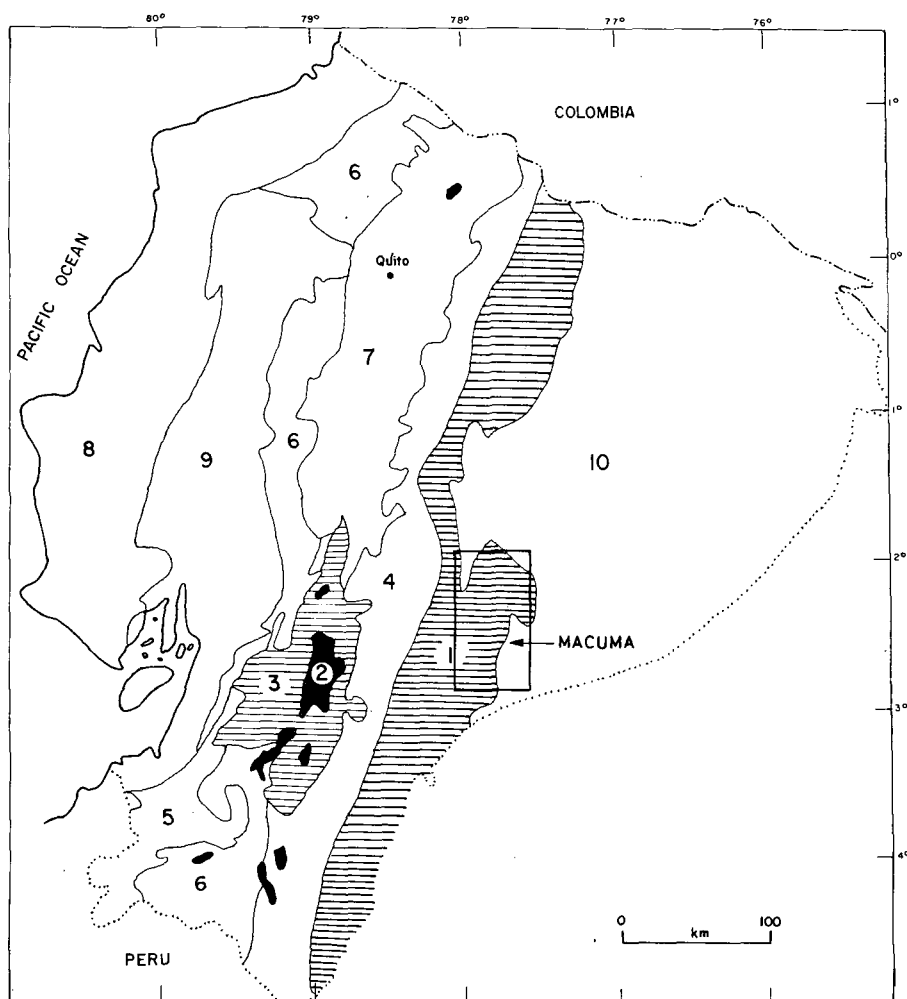


FIG.3. Priority areas for uranium exploration.

The uranium data showed a mean of 0.2 ppm, a 90 percentile value of 1 ppm, and a maximum value of 6 ppm. Comparison of the uranium and copper distribution patterns in stream sediments indicated a lack of correlation of the two elements. Some 48 areas of elevated uranium response were defined on a statistical basis (uranium >1 ppm), but subsequent field-checking of seven selected zones indicated that the stream sediment values could be explained entirely in terms of bed-rock values, where the highest values (5 ppm of uranium) were obtained in granodiorites. Due to lack of clear encouragement, further work is not planned in this area of the southern Sierra.

### 3. CURRENT EXPLORATION ACTIVITY (1978)

#### 3.1. Geological priorities

As the first step in planning a long-term national exploration programme it was decided to establish priorities by utilizing geological models coupled with a knowledge of uranium occurrences elsewhere in the Andean Cordillera. This enabled the delineation of ten zones (Fig.3) each assigned a priority regarding their uranium potential.

The first priority area (zone 1) located in the Andean foothills has been recognized as a highly prospective area for over a decade [1] on the basis of suitable host sediments in juxtaposition with potential source rocks of the Cordillera Oriental. Furthermore, broad stratigraphic correlations can be drawn with uranium districts in Venezuela, Colombia and northern Argentina (Tonco district), involving *Pennsylvanian, Jurassic and Cretaceous sequences* in accord with palaeogeographic reconstructions [5].

Occurrences of uranium have been located in Cretaceous asphaltic sediments (by scintillometric reconnaissance), and although analyses range up to 100 ppm of uranium no uranium minerals have yet been observed.

Zone 2 covers the eight discrete freshwater sedimentary basins of Miocene age which are situated along the Sierra. Prospective sequences have been identified, and minor uranium occurrences are known near the margins of two of these basins.

Zone 3 relates to the Tertiary acid volcanics which straddle the southern central portion of the Sierra. Hydrothermal activity is manifested by alteration zones and epithermal argentiferous mineralization is known at San Bartolomé (Cuenca). This geological environment bears comparison with uranium districts located within similar volcanics in both Mexico and Bolivia.

Zones 1, 2 and 3 are assigned high priority for exploration, and total some 41 000 km<sup>2</sup> or 15% of the national territory.

Zone 4 (metamorphics in the Cordillera Oriental), and zone 5 (Cretaceous sediments in the southern Sierra) may also be interesting, but they are both accorded a low exploration priority.

Zone 6 corresponds largely with Cretaceous andesites, basalts with minor sediments and pyroclastics, and acid intrusives of the western Cordillera, which in the southern Sierra has already received a preliminary screening by means of reconnaissance drainage geochemistry, as noted in section 2.

Zone 7 in the northern Sierra is generally believed to be of little interest as regards uranium, but the recent discovery of radioactive bones (with uranium analyses up to 100 ppm) in Pleistocene volcanogenic sediments 10 km northeast of Quito indicates the need for further investigation.

Zone 8 occupies the coastal belt of predominantly Tertiary marine sediments associated with Cretaceous volcanics. Although assigned a very low priority,



Stream sediments and aquatic bryophytes were collected at a density of 1 sample/2 km<sup>2</sup> for subsequent fluorimetric uranium analyses and radium analyses by radiometry.

In view of the uncertainty as to the principal mode of uranium dispersion (detrital versus solution), analyses were performed on both minus 170 and minus 75  $\mu\text{m}$  fractions of the drainage sediments. Bryophytes were carefully washed free of entrapped sediments before dry-ashing.

The analytical results for uranium indicated a greater range of results in the finer fraction, with values up to 3.4 ppm compared to a maximum of 1.3 ppm in the minus 170  $\mu\text{m}$  fraction. Uranium levels in bryophytes ranged up to 8 ppm (dry-weight basis) and a strong correlation was observed of uranium distribution in sediments (minus 75  $\mu\text{m}$ ) with bryophytes. Coincident uranium anomalies (bryophytes and sediments) have indicated a horizon of interest within Cretaceous sediments.

The uranium levels observed in bryophytes clearly reflect the hydromorphic dispersion of uranium. However, the correspondence of bryophyte and sediment uranium distributions also indicates an effective equilibrium between the mechanical and chemical dispersion modes for uranium.

Radium analyses on six selected sediment samples revealed that equivalent radium concentrations ranged from 0 to 100% in excess of the observed uranium concentrations, which can be explained by either selective leaching of uranium and/or preferential precipitation of radium.

Although a degree of disequilibrium has been demonstrated, it is nevertheless considered insufficient to invalidate reconnaissance radiometric surveys. However, thorium-rich zones have also been located in these Cretaceous sediments and spectrometry is therefore indicated to have some advantage over scintillometry in this environment.

The results from this initial pilot survey suggest that a second stage is now required to accurately define the limitations and optimum procedures for both geochemical and radiometric reconnaissance surveys in this environment.

### 3.3. Exploration data compilation

Although there are as yet no large metallic mining operations in Ecuador, there has been considerable exploration activity in the Sierra, primarily for porphyry copper mineralization. This has involved both geochemical and geophysical surveying, combined with extensive geological mapping.

Oil and gas exploration has been conducted in the Costa and Oriente regions [6] for 40 years, and surveys by land and air have consumed an estimated US \$300 million. In addition to this, some 200 holes have been drilled to yield a wealth of geological data, including gamma logs.

It is clearly a major and very important task to extract all relevant information from this data-bank which will assist in planning an exploration strategy for uranium.

Progress to date has been limited to establishing the principal data sources.

#### 4. CONCLUSIONS

Uranium exploration has been carried out intermittently and on a very limited scale over the past 12 years. Although no significant mineralization has been encountered to date, this does not lessen prospective interest in the three geological environments, which comprise some 15% of the national territory and which have been assigned first priority for uranium exploration.

These areas (zones 1, 2 and 3) cover the Andean foothills in the Oriente region and the Miocene freshwater basins and Tertiary acid volcanics of the Sierra. With the exception of the Miocene freshwater Cuenca Basin, these three zones remain essentially unexplored.

Large-scale systematic exploration for uranium in Ecuador can be rationalized in terms of generating significant export earnings and/or providing domestic fuel for the 1990s. It is believed that exploration should commence now in view of the lead-time of up to 15 years which is required to produce marketable uranium oxide (yellow cake).

The Ecuadorian Atomic Energy Commission is now preparing a national plan to evaluate the uranium resources of Ecuador. In view of the large exploration budget and the degree of technical expertise required to carry this through, it seems desirable to attract organizations from other countries to participate in this uranium exploration programme.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The assistance of the Ecuadorian Atomic Energy Commission in preparing this paper, particularly of F. Muñoz and R. Levoyer, is gratefully acknowledged; J. Aucott and O. Garzón constructively reviewed the manuscript. P. Narváez prepared the diagrams while X. García and E. Irigoven typed the manuscript.

#### REFERENCES

- [1] CAMERON, J., *Prospección de Materias Primas Nucleares*, Technical Assistance Report No.320, IAEA, Vienna (1967).

- [2] GROSSMAN, E., CARRIÓN, J., CARRILLO, O., Prospection for radioactive minerals in Equador, *Politécnica II* 1 (1970) 141.
- [3] ANON., 1972 Exploration for Metallic Minerals in Southern Ecuador (Operation No.8, Loja-BI Oro), United Nations Development Programme Technical Report No.13, UN, New York (1972).
- [4] SEVERNE, B., Uranium Prospection, Technical Assistance Report No.1434, IAEA, Vienna (1979).
- [5] HARRINGTON, J., Paleogeographic development of South America, *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* **46** (1962) 1773.
- [6] TSCHOPP, H.J., Oil exploration in the Oriente of Ecuador, 1938-1950, *Am. Ass. Pet. Geol. Bull.* **37** (1953) 2303.



## EXPLORACION DE URANIO EN VENEZUELA: SITUACION A FINES DE 1978

J. PASQUALI

Consejo Nacional para el Desarrollo  
de la Industria Nuclear (CONAN),  
Caracas, Venezuela

### Abstract-Resumen

#### URANIUM EXPLORATION IN VENEZUELA: SITUATION AT THE END OF 1978.

Uranium exploration started in Venezuela in 1951. The activities began with enthusiasm but interest waned because of the unfavourable economic conditions of the uranium market. In 1975, with the establishment of the National Council for the Development of the Nuclear Industry, emphasis was once again placed on exploration for radioactive minerals. Systematic exploration began 18 months ago, and so far exploratory targets have been found in phosphate rocks in Táchira state and in Palaeozoic granites at El Baúl (Cojedes state); very favourable occurrences have been encountered in the Precambrian in Mérida and Bolívar states, and in continental Tertiary rocks in Trujillo state.

#### EXPLORACION DE URANIO EN VENEZUELA: SITUACION A FINES DE 1978.

La exploración de uranio en Venezuela tuvo sus comienzos en 1951. El entusiasmo mostrado al principio fue bajando con el tiempo a causa de las condiciones económicas desfavorables del mercado de uranio. En 1975 se creó el Consejo Nacional para el Desarrollo de la Industria Nuclear, con lo cual se volvió a dar importancia a la exploración de minerales radiactivos. La exploración sistemática empezó hace año y medio y hasta ahora se han encontrado blancos exploratorios en rocas fosfáticas del estado Táchira y en granitos paleozoicos de El Baúl (estado Cojedes), situaciones muy favorables en el Precámbrico del estado Mérida y estado Bolívar y en rocas terciarias continentales del estado Trujillo.

### 1. INTRODUCCION

El propósito de este trabajo es el de informar del estado actual de la exploración de uranio en Venezuela, incluyendo su concepción metodológica, el programa nacional que la guía y sus resultados. Se espera que con esto se logre, por un lado, la crítica constructiva de los colegas que están trabajando en lo mismo en otros países y, por el otro, aportar informaciones que puedan ser de utilidad para aquellos que estén explorando en pos de uranio en condiciones análogas.

La exploración en busca de materiales radiactivos comenzó en Venezuela con un trabajo conjunto entre el United States Geological Survey y la Dirección

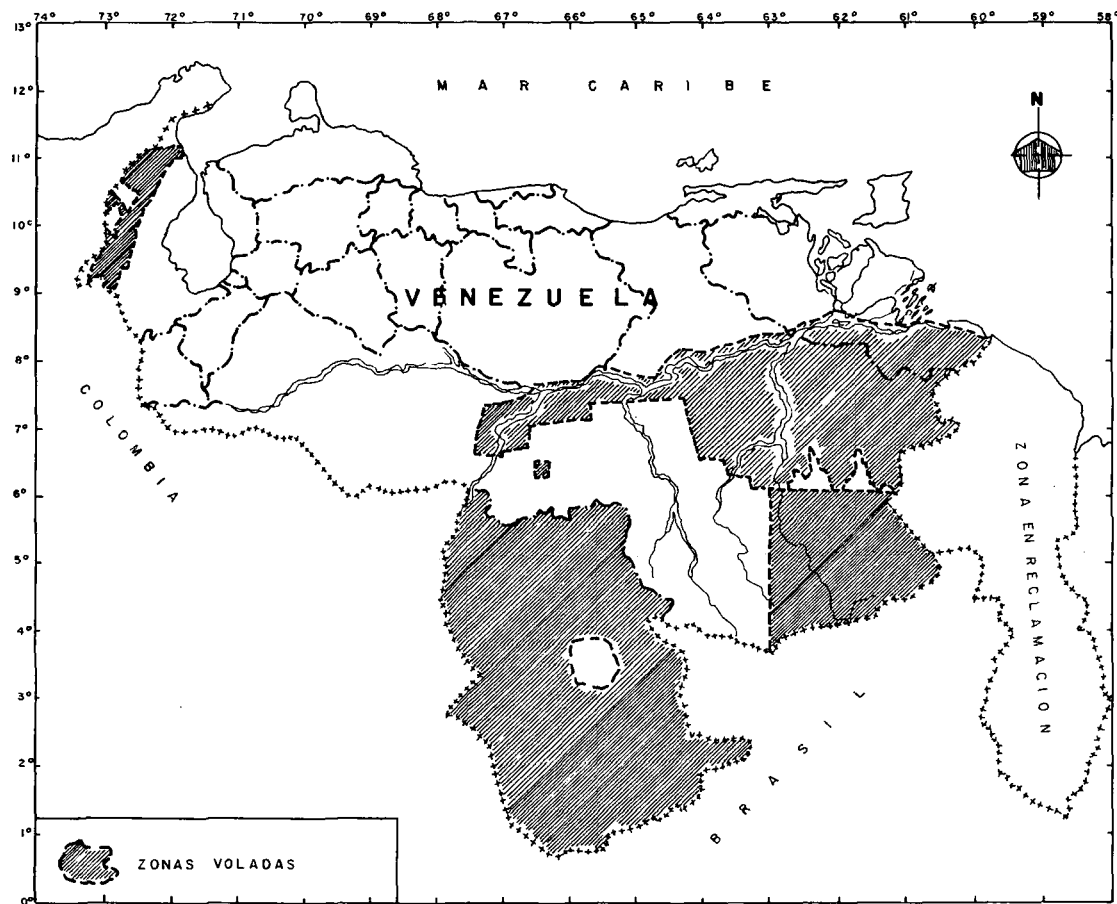


FIG.1. Area cubierta por radiometria aérea.

de Geología del Ministerio de Minas e Hidrocarburos, en 1951. Este trabajo duró tres meses y consistió en una recopilación de datos bibliográficos y visitas al campo, con lo cual se pudo construir una idea general, válida para aquella época, de las situaciones favorables para la búsqueda [1].

El interés generado por el trabajo inicial se expresó en una serie de levantamientos autotransportados de radiaciones gamma en diversas regiones del país, y en algunos análisis radiométricos de rocas (en equivalentes de U) hechos por profesionales de la Dirección de Geología.

Con el tiempo, la situación comercial del uranio en los mercados se tornó desfavorable, lo que hizo que se terminaran otros estudios y que se incluyeran los radiactivos en los programas generales de exploración. Dentro de estos programas generales se hicieron vuelos magnéticos y radiométricos sobre extensas regiones del país (Fig.1).

El establecimiento de la nucleoelectricidad como método viable y económico, y su crecimiento produjeron, en 1974, un renovado interés en la exploración de uranio en Venezuela. Ese mismo año se creó la Comisión Nacional para Asuntos Nucleares y, en 1975, el Consejo Nacional para el Desarrollo de la Industria Nuclear (CONAN) [2].

El decreto constitucional de CONAN establece que el desarrollo de la industria nuclear es de utilidad pública. La planificación de la exploración, entre otras cosas, le es asignada a CONAN, mientras que la ejecución de la exploración de materias primas radiactivas se lleva a cabo entre éste y la Dirección General Sectorial de Minas y Geología del Ministerio de Energía y Minas.

En 1976 se preparó el Plan Nacional de Exploración de Uranio en Venezuela y se publicó en 1977 con ocasión del V Congreso Geológico Venezolano [3]. En este plan se toman en cuenta los ambientes geológicos favorables para el criadero de los diversos tipos de yacimientos de uranio descritos en la literatura, la accesibilidad a las zonas y el costo de los métodos a aplicarse en cada caso. Estas consideraciones permitieron ordenar las diversas regiones asignándoles prioridades, y determinar un nivel de actividades en términos de número de profesionales y de presupuesto requerido. En este sentido se ha considerado adecuado mantener un grupo de 25 profesionales de Ciencias de la Tierra, y una inversión anual de unos 2 millones de dólares. Estas inversiones están previstas para la fase exploratoria únicamente y excluyen expresamente los costos de perforaciones evaluativas.

La ejecución de las actividades de exploración de uranio en Venezuela, guiadas por el Plan Nacional, comenzaron hace un año y medio. Seguidamente se presentarán los resultados más sobresalientes obtenidos en ese lapso de tiempo.

Debido a que hace tan poco tiempo que se iniciaron las labores de prospección, el estado de la información referente a cualquier región cambia muy rápidamente. En muchos casos, lo que parece obvio que debiera haberse hecho, no se ha realizado por simple falta de tiempo.

## 2. PROGRESOS DE LAS EXPLORACIONES

Las regiones consideradas con prioridad para la exploración de uranio en Venezuela han sido los estados andinos de Táchira, Mérida y Trujillo, el estado Bolívar, que representa buena parte del escudo precámbrico, y la región de El Baúl, perteneciente al estado Cojedes.

### 2.1. Estados andinos

El ramal de Los Andes que corresponde a Venezuela constituye geológicamente, de forma muy breve, un núcleo pre-cámbrico de rocas metamorfizadas de origen sedimentario e ígneo. El núcleo está rodeado de rocas paleozoicas de cuenca profunda (filitas), rocas mesozoicas de origen continental y marino, y rocas terciarias de ambiente marino y continental. El ambiente tectónico predominante es el de fallamiento gravitacional, que complica considerablemente el estudio de la región.

Los principales blancos geológicos que han sido reconocidos hasta ahora son las rocas de composición granítica del Precámbrico, la formación La Quinta del Jurásico continental (en parte la formación Girón en Colombia), las formaciones La Luna y Navay del Cretácico, las formaciones Isnotú y Betijoque del Terciario continental, y la zona de falla de Boconó con alguna de sus fallas laterales.

Utilizando dos sistemas autotransportados que detectan las radiaciones gamma del medio y las diferencias en sus componentes correspondientes a la desintegración del potasio, uranio y torio, se han recorrido las carreteras de los estados Táchira, Mérida, Trujillo, Portuguesa y Lara.

Esta cobertura por radiometría autotransportada se ha considerado insuficiente para detectar la mayoría de las zonas de interés, por lo que se ha procedido a un levantamiento geoquímico regional con sedimentos de quebrada en los estados Táchira y Mérida. Si este procedimiento resulta eficaz, se extenderá su aplicación a otros estados.

A continuación se esbozan los resultados obtenidos en los diversos blancos exploratorios detectados.

#### 2.1.1. *Precámbrico*

En el grupo Iglesias del Precámbrico del estado de Mérida se han detectado dos anomalías radiométricas en suelos desarrollados sobre una secuencia de gneises graníticos interestratificados con anfíbolitas. Estas anomalías están actualmente bajo investigación. Su importancia radica en el hecho de que establecen la presencia de facies enriquecidas en uranio en rocas de esta edad, las cuales han sido revisadas de forma muy incompleta porque representan la parte más alta de nuestros Andes, por donde las carreteras no son muy comunes.

Las anomalías tienen longitudes, a lo largo de la carretera, de 2 km y 1 km respectivamente. En ellas se han encontrado concentraciones en suelos desarrollados sobre faldas muy pendientes, de 60 ppm de U, y no se ha establecido su procedencia con respecto a las rocas que le dan origen.

### 2.1.2. *Jurásico (La Quinta)*

En la formación La Quinta, una secuencia continental de capas rojas esencialmente, con influencia volcánica ácida e intermedia, se ha localizado una serie de anomalías y dos pequeñas mineralizaciones.

Una de estas mineralizaciones es de Cu-U, asociada a una brecha interformacional compuesta por fragmentos líticos de roca volcánica ácida y arenisca cuarzosa. El cobre está en el mineral malaquita y el uranio en uraninita. El horizonte tiene pocos centímetros de espesor y se ha seguido por unos 60 metros. Su posición estratigráfica es difícilmente correlacionable porque el espesor y características de las secciones de La Quinta varían mucho lateralmente en distancias cortas.

La otra mineralización se encuentra en lentes de carbón que hasta ahora han demostrado tener una continuidad lateral limitada. Es posible que estos carbones, que tienen un contenido de uranio de hasta 2000 ppm, representen acumulación de materia orgánica en ambientes lacustrinos.

Se están llevando a cabo ahora estudios estratigráficos detallados de la formación La Quinta con el propósito de guiar las próximas exploraciones.

### 2.1.3. *Cretácico (La Luna-Navay)*

La formación La Luna está compuesta por lutitas y calizas oscuras y fétidas. En la cuenca del lago de Maracaibo se ha establecido como la roca madre de algunos crudos. En varias secciones estratigráficas de su considerable extensión regional presenta capas fosfáticas que, por ser uraníferas, se detectan fácilmente por radiometría gamma. La concentración de uranio en estas capas fosfáticas es de unas 100 ppm.

Se ha detectado una gran anomalía, o conjunto de anomalías, en el miembro Quevedo de la formación Navay, que es un equivalente lateral de la formación La Luna, al este de la población de San Joaquín de Navay, estado Táchira.

La formación La Luna cambia de facies en esta región, donde se llama formación Navay y donde se forman extensas capas fosfáticas, porque se encuentra entre la cuenca profunda de Uribante al oeste y la cuenca somera de Barinas al este. Aparentemente, el flujo hacia la superficie de corrientes de aguas profundas de la cuenca de Uribante, ricas en fosfatos, ha causado la precipitación de éstos en aguas relativamente someras, dando lugar a los sedimentos de la formación Navay.

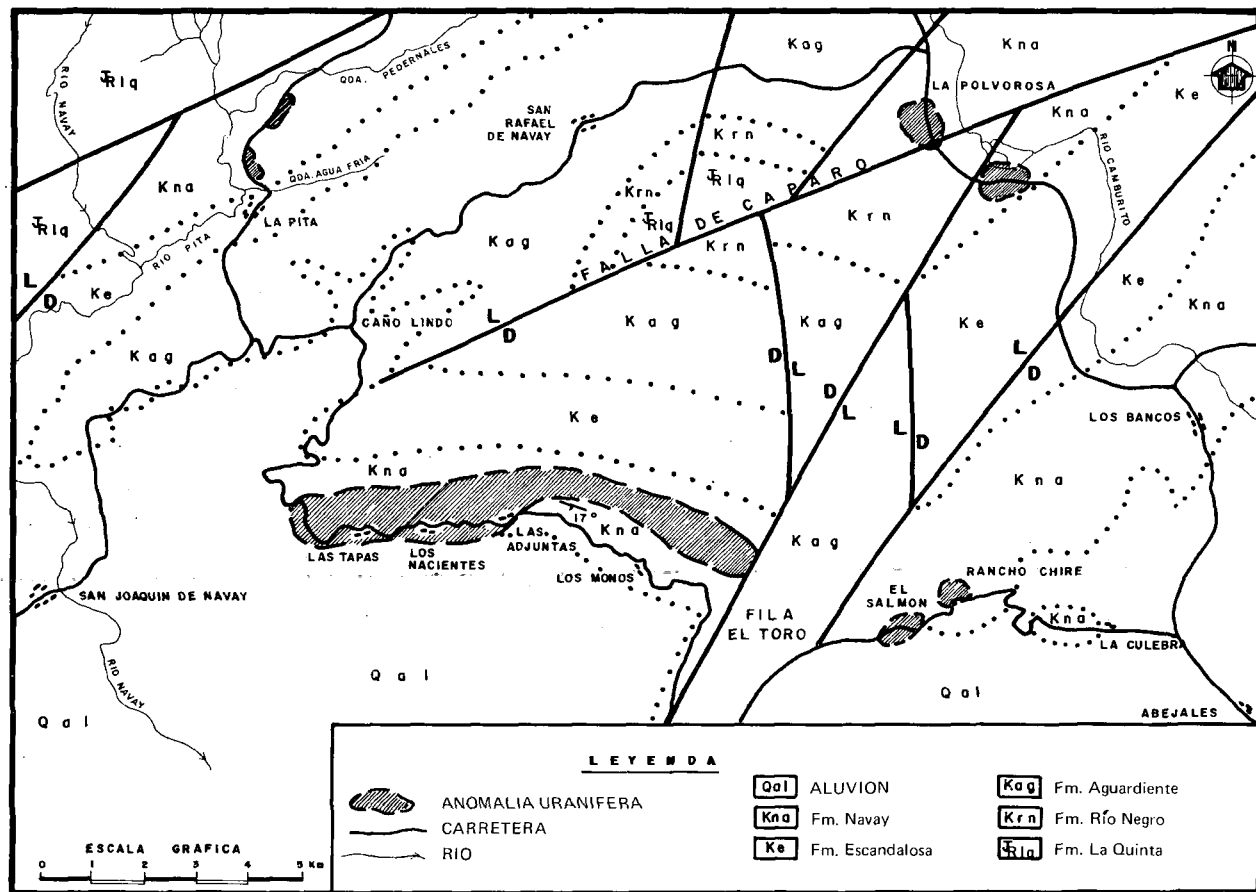


FIG. 2. Anomalías uraníferas en la región de San Joaquín de Navay-La Pita-Abejales, Dto. Libertador, estado Táchira.

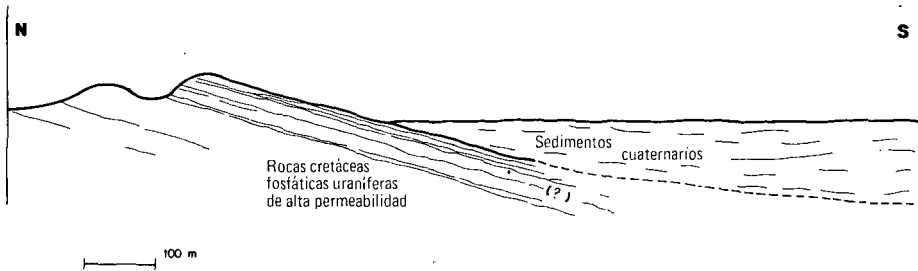


FIG. 3. Esquema de la situación geológica cercana a San Joaquín de Navay, estado Táchira.

La anomalía causada por capas fosfáticas tiene un desarrollo este-oeste de unos 12 km y norte-sur muy variable, de 200 a 1000 m. Las rocas correspondientes son capas fosfáticas formadas por restos de animales y por limolitas cuarzosas muy limpias con cemento fosfático. La concentración de uranio de estas rocas varía entre 100 y 400 ppm. Parte del uranio ha sido movilizado y se espera que parte de él se haya incorporado en los sedimentos cuaternarios adyacentes.

Las Figs 2 y 3 esquematizan la situación geológica de la anomalía de Los Nacientes, Abejales, estado Táchira. La Fig. 2, en planta, muestra la situación geológica local; aquí las capas fosfáticas están expuestas a lixiviación y erosión de tal forma que se espera que parte del uranio sea transportado en solución al ambiente de sedimentación, topográficamente plano, con abundante materia orgánica, y fijado allí [4].

La figura 3, en corte, muestra las capas de fosfato y de limolitas fosfáticas interestratificadas y sus relaciones con el ambiente de sedimentación adyacente. En la columna, las limolitas fosfáticas son muy porosas, permeables y friables, y han sufrido una lixiviación extensa, mientras que las capas esencialmente fosfáticas son relativamente impermeables.

Ciertos estudios detallados en curso de ejecución han establecido que hay capas fosfáticas de hasta 5 m de espesor, interestratificadas con limolitas y arenas finas cuarzosas, todas ellas con una considerable concentración de uranio. Se está pensando actualmente en acopiar más datos para poder examinar si es factible una extracción de fosfato en una serie de capas, extrayéndose fosfato, uranio y cuarzo para vidrio.

Se están estudiando en otras localidades anomalías uraníferas en rocas de la formación La Luna, o equivalentes laterales en los estados Mérida y Trujillo. El estudio de estas anomalías apenas ha comenzado, y no se tienen todavía suficientes conocimientos como para describir los controles geológicos que actúan en cada una de ellas.

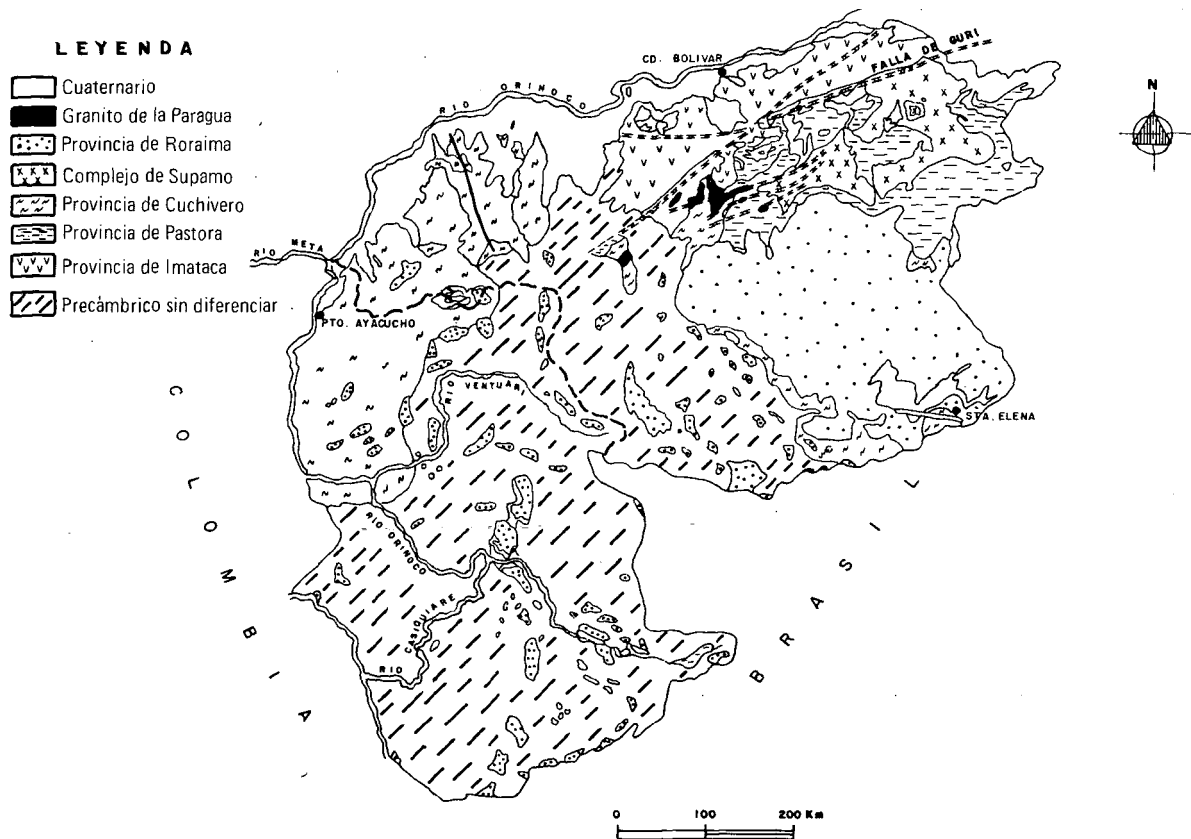


FIG.4. Geología simplificada del estado Bolívar y territorio federal de Amazonas.

#### 2.1.4. Terciario

En la formación Isnotú y Betijoque del estado Trujillo se ha detectado una serie de anomalías radiométricas débiles, en superficie. Se está dando importancia a estos ambientes porque son continentales, contienen areniscas lenticulares, lutitas, conglomerados y material orgánico, lo que proporciona el factor precipitante para el uranio.

#### 2.1.5. Falla de Boconó y sus ramales

En los levantamientos radiométricos realizados en la región andina se ha localizado una serie de anomalías de diversa intensidad que tiene la propiedad de alinearse en ciertas secciones de la falla de Boconó o en algunos de sus ramales. Como la tectónica andina en Venezuela está dominada por fallamiento gravitacional, es posible que el uranio sea movilizado en este ambiente y fijado a lo largo de sitios favorables de algunas fallas. Estos aspectos están actualmente bajo estudio.

### 2.2. Estado Bolívar

En el estado Bolívar y el territorio federal de Amazonas (Fig.4) se encuentran las mayores expectativas de yacimientos de uranio de tamaño considerable en Venezuela. Se han realizado allí extensos vuelos radiométricos y magnetométricos (Fig.1) que han descubierto una gran cantidad de anomalías radiométricas, y que representan un complejo problema de interpretación.

Se ha comenzado apenas a revisar en tierra algunas de estas anomalías y descubrir otras por radiometría autotransportada. En la provincia de Imataca, que contiene rocas de edades comprendidas entre 3400 y 2700 millones de años, las anomalías se encuentran en rocas gnéisicas, producto de la refusión o anatexis de las rocas más antiguas.

Se ha encontrado que la discordancia entre la provincia de Cuchivero (lavas y piroclásticas ácidas) y el grupo Roraima, cercana a las poblaciones de Santa Elena e Icabarú, es levemente radiactiva en los dos sitios donde es cortada por la única carretera de la región. Este hecho ha animado a nuestro grupo de exploración a planificar el estudio de esta discordancia en toda su extensión. Es de notar que, asociados a discordancias de esta edad, se han encontrado grandes yacimientos de uranio en Canadá, Sudáfrica y Australia. Y es posible que los colegas brasileños hayan examinado en su país esta misma situación geológica.

En la provincia de Pastora se ha encontrado una masa intrusiva, la del granito de La Paragua, con una edad de 1300 millones de años [5], que ha resultado ser anómala con respecto a las volcánicas ácidas que intrusióna y con respecto a otras intrusivas del estado Bolívar.

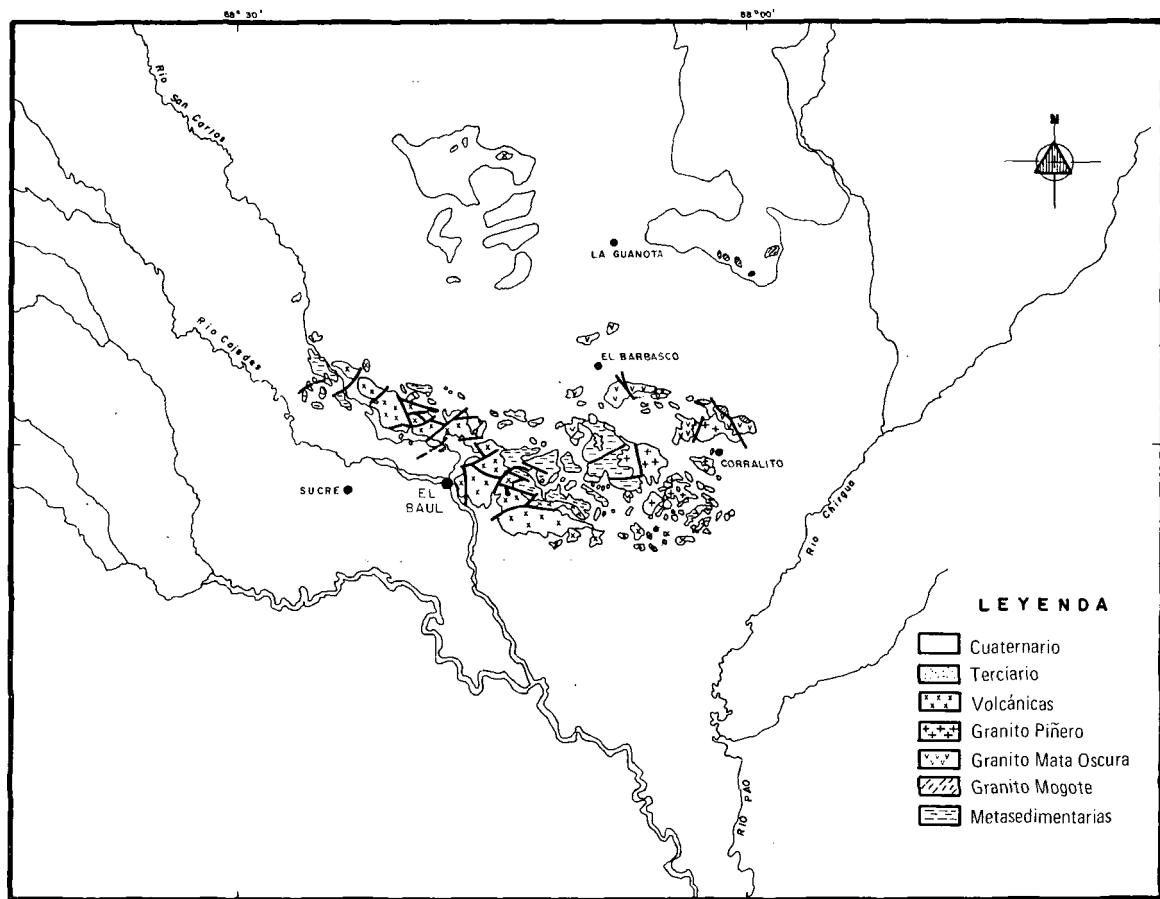


FIG. 5. Esquema geológico de la región El Baúl, estado Cojedes.

### 2.3. Estado Cojedes

La región de El Baúl, estado Cojedes (Fig.5), ha resultado ser radiométricamente anómala con respecto a todas las rocas que se han estudiado en ella.

Brevemente, en la región de El Baúl, situada en Los Llanos occidentales, afloran rocas metasedimentarias del Paleozoico inferior, granitos intrusivos en esas metasedimentarias, de 270 millones de años [5], y extensas volcánicas ácidas e intermedias que son más jóvenes que los granitos [6]. Alrededor de este núcleo más antiguo se han depositado en el Terciario rocas de ambiente continental, parálico y marino.

Se ha encontrado que una de las facies de los granitos presentes es, dentro del área que es anómala de por sí, mucho más anómala que el resto. En esta facie, que tiene bordes sieníticos, se han encontrado pequeñas mineralizaciones de torita uranífera en zonas de cizallamiento. La torita ( $\text{ThSiO}_4$ ) rellena delgadas fracturas paralelas a la dirección de cizallamiento y tiene una concentración de uranio de unas 2000 ppm.

La región de El Baúl será objeto de estudios intensivos en los próximos años, con el objeto de evaluar su potencial radiactivo en las rocas paleozoicas y en las rocas terciarias derivadas que las circundan.

### 3. CONCLUSIONES

Sobre la base del breve análisis hecho de la situación de la exploración de uranio en Venezuela a fines del año 1978, se concluye:

- 1) La exploración razonablemente intensiva de uranio en Venezuela empezó hace año y medio, por lo que representa una actividad incipiente en la que los conceptos de las situaciones geológicas encontradas varían rápidamente con las constantes adquisiciones de datos.
- 2) La exploración de uranio en Venezuela, como parte del desarrollo de la industria nuclear, es considerada como de utilidad pública. Su planificación es realizada por CONAN, y su ejecución en conjunto entre la Dirección General Sectorial de Minas y Geología y CONAN.
- 3) La exploración de uranio en Venezuela es guiada por un plan nacional que contempla la participación de unos 25 profesionales de Ciencias de la Tierra y un ritmo anual de gastos, para los primeros años, de unos 2 000 000 de dólares, sin incluir los gastos de perforaciones evaluativas.
- 4) Hasta ahora, la exploración de uranio en Venezuela ha encontrado muchas manifestaciones, dentro de las cuales se consideran de mayor interés las siguientes:
  - Rocas precámbricas de la formación Sierra Nevada en el estado Mérida;
  - Rocas continentales de la formación La Quinta en los estados Táchira y Mérida;

- Rocas fosfáticas de la formación Navay en los estados Táchira y Mérida;
- Rocas terciarias continentales de las formaciones Isnotú y Betijoque en el estado Trujillo;
- Rocas de diversas edades a lo largo de la zona de falla de Boconó y sus ramales;
- La discordancia entre el grupo Roraima y las rocas subyacentes, todas precámbricas en el estado Bolívar y el territorio federal de Amazonas;
- El complejo ígneo-metamórfico de El Baúl, estado Cojedes, y sus sedimentarias derivadas.

## REFERENCIAS

- [1] WYANT, D.G., SHARP, W.N., PONTE, C., "Radioactive source materials in Venezuela", Informe preliminar, Ministerio de Energía y Minas, Caracas (1952) 181.
- [2] Normas para el desarrollo de la industria nuclear, Gaceta Oficial de Venezuela, N<sup>o</sup> 1751 extraordinario (1975) 1-2.
- [3] PASQUALI, J., "Plan nacional de exploración de uranio en Venezuela", Memorias del IV Congreso Geológico Venezolano, Caracas, Vol. III (1977) 989.
- [4] LANGMUIR, D., Uranium solution-mineral equilibrium at low temperature with applications to sedimentary ore deposits, *Geochim. Cosmochim. Acta* **42** (1978) 547.
- [5] MARTIN BELLIZZIA, C., Edades isotópicas de rocas venezolanas, *Bol. Geol.* **X** 19 (1968) 356.
- [6] MARTIN BELLIZZIA, C., Geología del macizo de El Baúl, Estado Cojedes, *Bol. Geol., Publ. especial* N<sup>o</sup> 3 (1961) 1453.

## DISCUSSION

J.E. MENDOZA: Have you identified volcanic areas and molasse-type sediments in Venezuela in the Girón (Colombia) and La Quinta Formations? Is there in Venezuela any true equivalent of the Girón Formation in Colombia?

J. PASQUALI: The La Quinta Formation in Venezuela has recently been studied in great detail. Two stratigraphic intervals have been established in this site: a lower one, with acidic and intermediate pyroclastic volcanic influence, red and grey sandstones, and conglomerates; and an upper one, composed essentially of red-coloured sandstones typical of red-beds, in which there is no detectable volcanic influence. The anomalies and mineralizations which have so far been found are restricted to the rocks in the reducing environment of the lower interval. It should be noted that the thickness and characteristics of the essentially continental environment sediments of the La Quinta Formation vary rapidly in a lateral direction and so correlation is particularly difficult.

A.E. BELLUCO: What is the area of geological uraniferous favourability in Venezuela?

J. PASQUALI: A full answer to this question would require more time than we have available. Table 1 of the Venezuelan National Uranium Exploration Plan, published in the proceedings of the 5th Venezuelan Geological Conference in December 1977, contains the data that you require, including the most important favourability factors that were considered.

A.E. BELLUCO: What area is to be explored and what will be the reliability of the results?

J. PASQUALI: Intensive prospecting by means of carborne radiometry has so far been carried out over about 200 000 km<sup>2</sup>.

L.E. PEREZ: You mentioned phosphatic levels. Can you say something more about the uranium content of these phosphorites?

J. PASQUALI: The uranium content of the phosphorites that have been explored in the southeast Andes (Táchira state) varies from 100 to 400 ppm.

J. VALENCIA: What is the age and the nature of the limestones in the La Luna Formation? I believe similarities were found with the Cretaceous limestones of the Paritambo Formation in the centre of Peru.

J. PASQUALI: The La Luna Formation belongs to the Upper Cretaceous and is characterized by a composition of limestones and fetid lutites having regional extension. In certain places there is considerable development of phosphatic beds, which have a uranium content of about 100 ppm.

U.G. CORDANI: I would like to say, with regard to the age of the Roraima Formation, that the best evidence comes from the Rb-Sr determinations made in acidic lavas of the underlying Surumu Formation. These give approximately 1900 million years.

I would also like to make one or two points relating to my talk yesterday which explained to some extent the distribution of uranium occurrences in Venezuela. The idea is that uranium is present in the rocks of the Archean continental crust, but favourable conditions for large-scale mineralizations occur in regions of tectonic reactivations and regenerations. As I showed yesterday, there is a very important mobile belt of Transamazonian age (1800–2100 million years) along the northern coast of South America (corresponding in Venezuela to the Cuitmanes region). This is composed of green rocks which are associated with the grey rocks of the Supamo complex. The Transamazonian age of these rocks has, I believe, recently been proved by Rb-Sr and U-Pb determinations. In this mobile belt there are a number of ancient nuclei which correspond to the continental Archean basement, as at Imataca in Venezuela or Fallawatra in Surinam. It is therefore in these polycyclic areas, which have undergone successive tectonic episodes of great intensity, that we must look for uraniferous mineralizations.

With regard to the volcanic-sedimentary sequences such as the Surumu-Roraima Formations or those further to the south such as Iri-*Río* Fresco,

Teles Pires-Beneficiente and others, I would say that some of them may represent molassoid deposits formed in pericratonic regions which are also favourable for the existence of uraniferous concentrations.

Finally, in connection with the Mérida Andes, you said that the best possibilities were to be found in the rocks of the Sierra Nevada Formation. There are recent age determinations of these rocks by the Rb-Sr method indicating a formation in the Precambrian, with ages of the order of 650 million years. Once again, we have here a situation where granitic-type rocks were tectonized in various successive phases in the Phanerozoic, providing good opportunities for the remobilization and concentration of uranium.

R.J. WRIGHT: Mr. Pasquali, perhaps I missed this point in your talk, but I would like to enquire about the age of the Roraima Formation and the age of the undifferentiated Precambrian rocks below.

J. PASQUALI: The Roraima Group can be dated at around 1700–1800 million years by the age of the diabase dykes that intrude into it which are about 1600 million years, and by the age of the acidic volcanic rocks on which it rests which have been dated at around 1900 million years. At some places the Roraima Group may rest upon rocks older than 1900 million years of diabasic and granitic composition.

# FAVORABILIDAD GEOLOGICA Y POTENCIAL URANIFERO DE LA ARGENTINA

A.E. BELLUCO

Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA),  
Cruz, Mendoza

F. RODRIGO

CNEA,  
Buenos Aires,  
Argentina

## Abstract-Resumen

### GEOLOGICAL FAVOURABILITY AND URANIFEROUS POTENTIAL OF ARGENTINA.

*A summary of the past uranium exploration activities is given with their respective results. A national programme is underway to identify and characterize the regional geological environments favourable for uranium exploration. The preliminary results of this work subdivide the country into eight geological environments within which 35 'exploration units' were proposed and exploration priorities assigned. The total surfaces for the latter are: first priority 270 000 km<sup>2</sup>; second priority 328 000 km<sup>2</sup>; third priority 143 000 km<sup>2</sup>.*

### FAVORABILIDAD GEOLOGICA Y POTENCIAL URANIFERO DE LA ARGENTINA.

*Se presenta un resumen de las actividades de exploración de uranio realizadas en el pasado, y de sus resultados respectivos. Se está ejecutando un programa nacional con el fin de detectar y caracterizar los ambientes geológicos regionales favorables para la exploración de uranio. Los primeros resultados de este trabajo han permitido dividir el país en ocho ambientes geológicos dentro de los que se han propuesto 35 'unidades de prospección' para las que se han fijado prioridades de exploración. Las superficies totales de estas unidades son: primera prioridad, 270 000 km<sup>2</sup>; segunda prioridad, 328 000 km<sup>2</sup>; tercera prioridad 143 000 km<sup>2</sup>.*

## 1. INTRODUCCION

Esta información tiende a presentar en dos capítulos conexos una reseña de las perspectivas geológico—uraníferas de la Argentina y una estimación de sus recursos geológicos potenciales de uranio.

Con esos fines se han utilizado sendas metodologías de trabajo, valiéndose de:

- La extrapolación a nivel nacional de todos los argumentos teóricos que brinda el actual conocimiento de la geología del uranio en el mundo.

CUADRO I. POTENCIAL GEOLOGICO-URANIFERO SEGUN NIVELES DE CERTIDUMBRE Y CATEGORIAS

Categorías económicas (dóls./lb de $U_3O_8$ )	Categorías de certidumbre		Recursos especulativos		
	RRA <sup>a</sup> (t de $U_3O_8$ )	RAE <sup>b</sup>	RAEF <sup>c</sup>	REMF <sup>d</sup> (t de $U_3O_8$ )	REBF <sup>e</sup>
>30	27 000	4 500			
30-50	6 000	6 000			
>50	3 000	4 500			
Subtotales	36 000	15 000	24 000	85 000	55 000
Totales	51 000			38 000	

<sup>a</sup> Recursos razonablemente asegurados.

<sup>b</sup> Recursos adicionales estimados.

<sup>c</sup> Recursos especulativos de alta favorabilidad.

<sup>d</sup> Recursos especulativos de mediana favorabilidad.

<sup>e</sup> Recursos especulativos de baja favorabilidad.

— Los resultados alcanzados a la fecha en el país, con las etapas de prospección—exploración y evaluación de sus recursos uraníferos.

Los alcances logrados hasta ahora permiten establecer que “la Argentina se puede clasificar entre los países del mundo que poseen un elevado Índice de Favorabilidad Geológico—Uranífera (IFGU)”.

Las siguientes consideraciones avalan esta conclusión:

- 1) Presencia de una amplia superficie en el territorio continental — aproximadamente 900 000 km<sup>2</sup> con buenos niveles de favorabilidad uranífera, acorde a la extrapolación de los parámetros geológicos que rigen la yacencia de ese elemento en el mundo.
- 2) Existencia de centenares de indicios de uranio y presencia de numerosos distritos uraníferos y yacimientos, cuyas reservas económicas van desde algunos centenares, hasta miles y decenas de miles de toneladas de uranio.
- 3) Estimar altamente satisfactorios los resultados de los programas de exploración y evaluación iniciados en algunos de los numerosos distritos uraníferos del país. Ello queda reflejado por ejemplo, en los resultados de los programas de sondeos donde se verifican relaciones estadísticas entre metros perforados y reservas cubicadas, muy por debajo de cifras internacionales (en Argentina 7 m/t  $U_3O_8$ , mientras que en E.E.U.U. tenemos 300–500 m/t  $U_3O_8$  y en Francia 150–200 m/t  $U_3O_8$ ).

- 4) Haber logrado a la fecha evaluar un aceptable nivel de “reservas” y estimar un importante valor de “recursos especulativos” de uranio en el país. Esta situación habilita a la CNEA a cubrir el requerimiento del actual programa nacional de reactores y a contar con los parámetros adecuados para implementar una política nacional para el desarrollo de materias primas nucleares del país.

El conjunto de esas estimaciones: “reservas” más “recursos especulativos”, integran a la fecha el “potencial geológico—uranífero” de la República Argentina (Cuadro I).

Las consideraciones antes expuestas permiten ser optimistas en cuanto a las expectativas de desarrollar los “recursos especulativos” y lograr transferirlos a otras categorías de certidumbre y economicidad del Cuadro I (véanse también las Figs 1 y 2).

Para ello será necesario implementar, a través de la política que fije el país, la ejecución de los programas sistemáticos de prospección de los centenares de miles de kilómetros cuadrados con buena favorabilidad geológica y la realización de los planes de exploración y evaluación de los distritos conocidos y por descubrir, mediante los centenares de miles de metros de perforación que se requieren para su desarrollo.

## 2. ANALISIS DE LA FAVORABILIDAD GEOLOGICO – URANIFERA DEL PAIS

### 2.1. Objetivos

Con esta etapa se pretendió alcanzar una serie de resultados generales y particulares que permitiesen:

- Establecer el encuadre geológico—uranífero general del país; delimitar sus Unidades de prospección; cuantificar sus niveles de favorabilidad; fijar los métodos de prospección más adecuados; analizar y evaluar sus anomalías y Distritos, y proceder finalmente a un ordenamiento general de las prioridades e importancias de cada una de esas unidades de trabajo.
- Conocer las dimensiones de ese encuadre nacional con el objeto de cuantificar las relaciones espacio/tiempo y recursos presupuestarios necesarios para su desarrollo.

Estas relaciones se vincularon con el programa nacional de instalación de centrales nucleares y con la evolución de las necesidades y precios previstos en el mercado mundial del uranio, a fin de apoyar los lineamientos técnico-políticos más adecuados para el desarrollo de los recursos uraníferos del país.

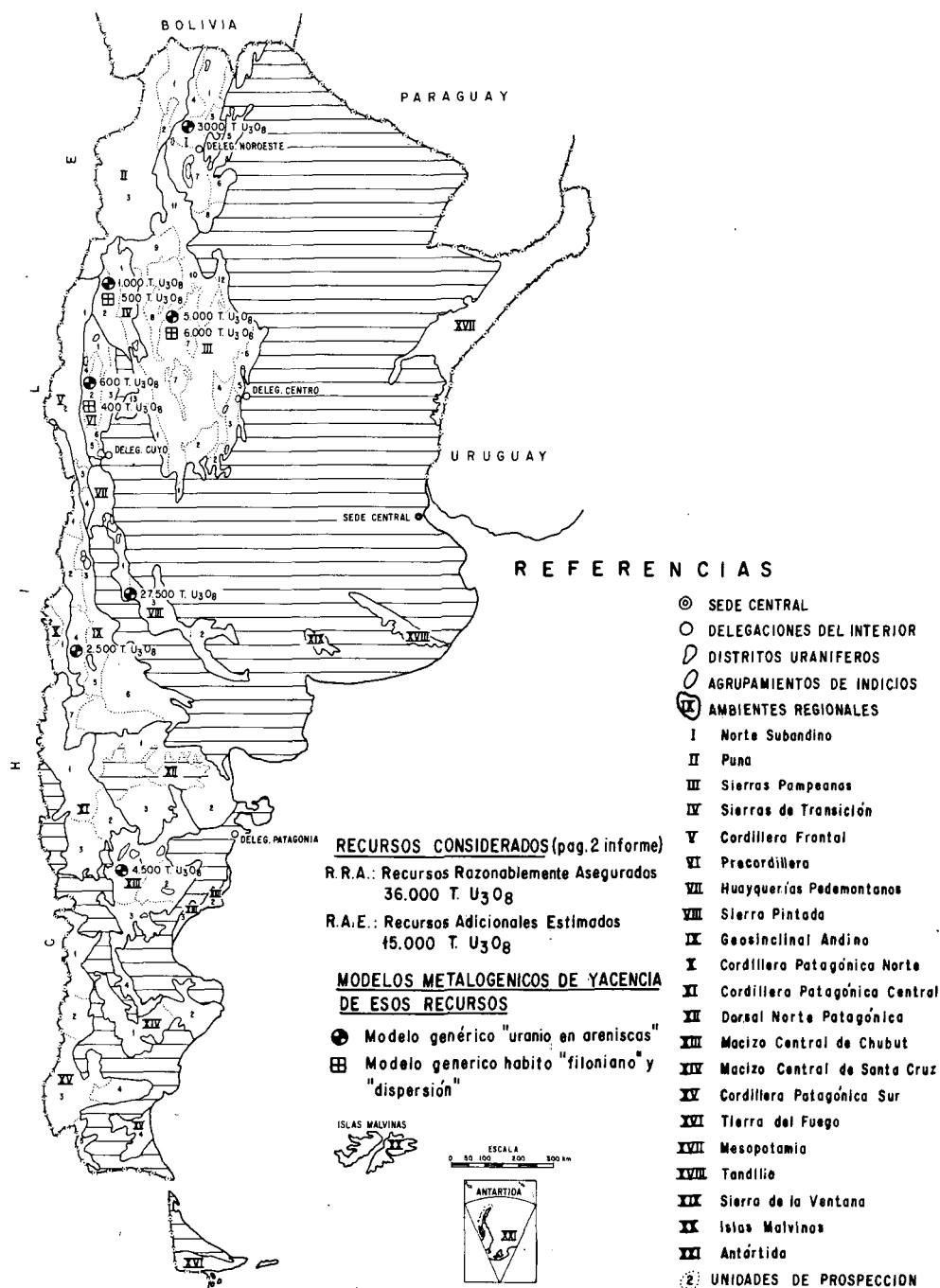


FIG.1. Distribución de los RRA y RAE por Ambientes regionales y modelos metalogénicos.

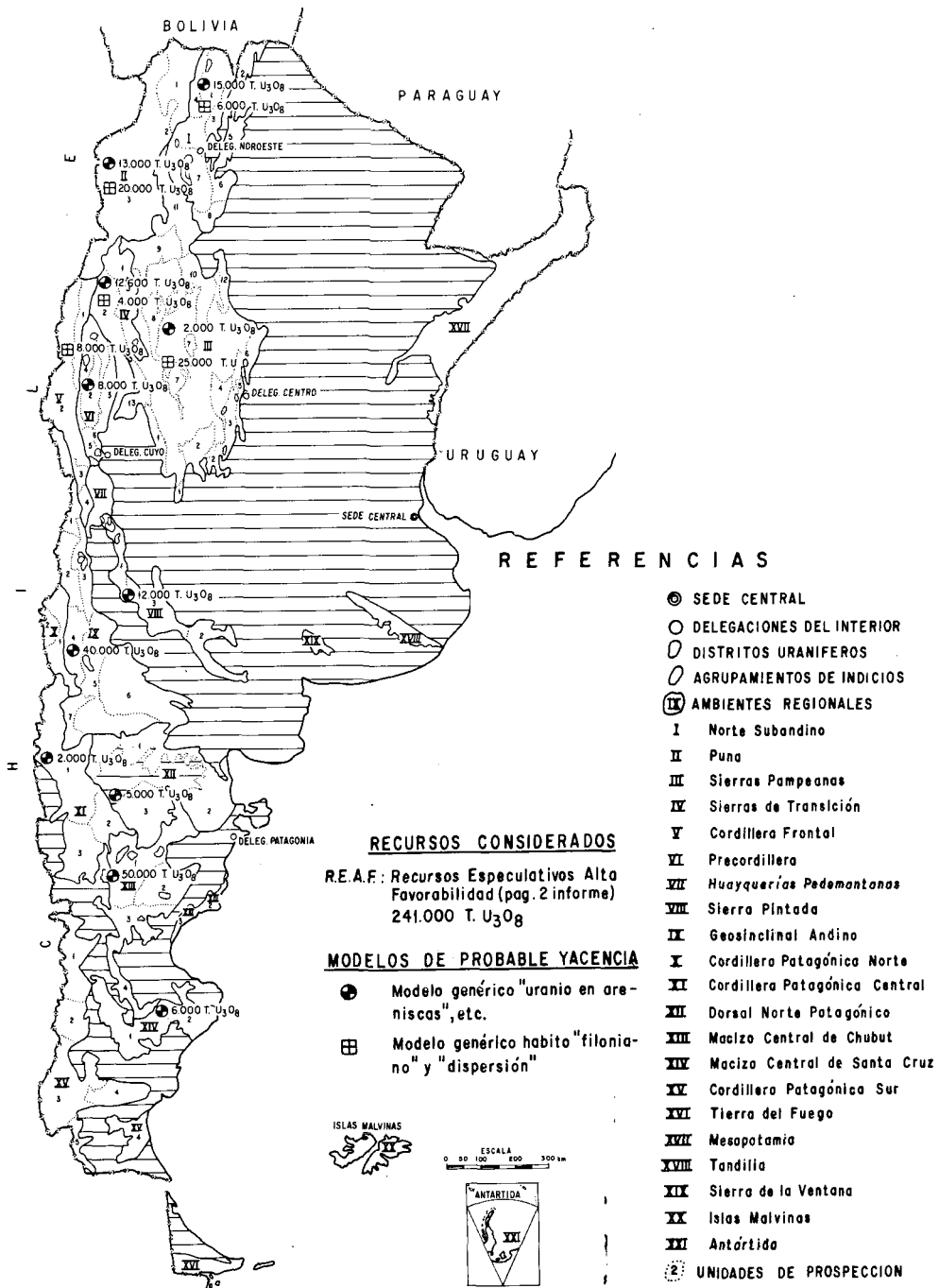


FIG.2. Distribución de los REAF por Ambientes regionales y modelos metalogénicos.

## 2.2. Metodología de trabajo

El desarrollo del método propuesto se fundamenta en la ejecución de las siguientes etapas analíticas y operativas:

### 2.2.1. *Delimitación de unidades de trabajo*

#### 2.2.1.1. Definición de “Ambientes geológicos regionales”

Estas entidades se delimitan en función del predominio en las mismas de determinadas unidades líticas:

- Rocas sedimentarias: continentales, marinas, etc.;
- Rocas ígneas: efusivas, intrusivas (ácidas, mesosilíceas, básicas);
- Rocas metamórficas: ectinitas, etc.

Se logra así establecer una primera definición de “unidades de trabajo”, cuyo análisis preliminar de favorabilidad geológico—uranífera se logra mediante una extrapolación a las mismas de las fases que rigen la yacencia de los principales modelos metalogénicos de uranio en el mundo.

En general dichos parámetros intentan definir preliminarmente la presencia de la cupla básica que rige la eventual existencia de todo yacimiento de uranio: “áreas de aporte fértil con uranio lábil” y “áreas de recepción apropiadas a la precipitación del ión uranilo”.

Si bien las dos condiciones geológico—uraníferas regionales son importantes, se estima que de ellas la corroboración de la existencia de áreas de aporte con uranio lábil involucra un avance básico en esta etapa, pues esas regiones no solo configuran la presencia esencial de una fuente fértil sino que las mismas pueden constituirse por sí mismas en “áreas de recepción” del uranio movilizado.

Además del análisis de estos dos parámetros básicos, cuando se desee llegar al nivel de cuantificación de la favorabilidad geológico—uranífera de los “Ambientes regionales”, se pueden evaluar otros parámetros que controlan la yacencia del uranio, como son: estructuras, agentes reductores, paleoclimas, paleorelieve, etc.

#### 2.2.1.2. Definición de “Unidades de prospección”

La gran amplitud de las superficies de los Ambientes regionales y, en ciertos casos, la diversidad de sus condiciones geológicas locales hacen aconsejable delimitar en su ámbito entidades menores de carácter operativo, que designamos genéricamente como “Unidades de prospección”. Su delimitación responde a similares principios de presencia predominante de ciertas unidades líticas, con un detalle mayor correspondiente a las diferenciaciones geológicas que es factible hacer sobre las mismas.

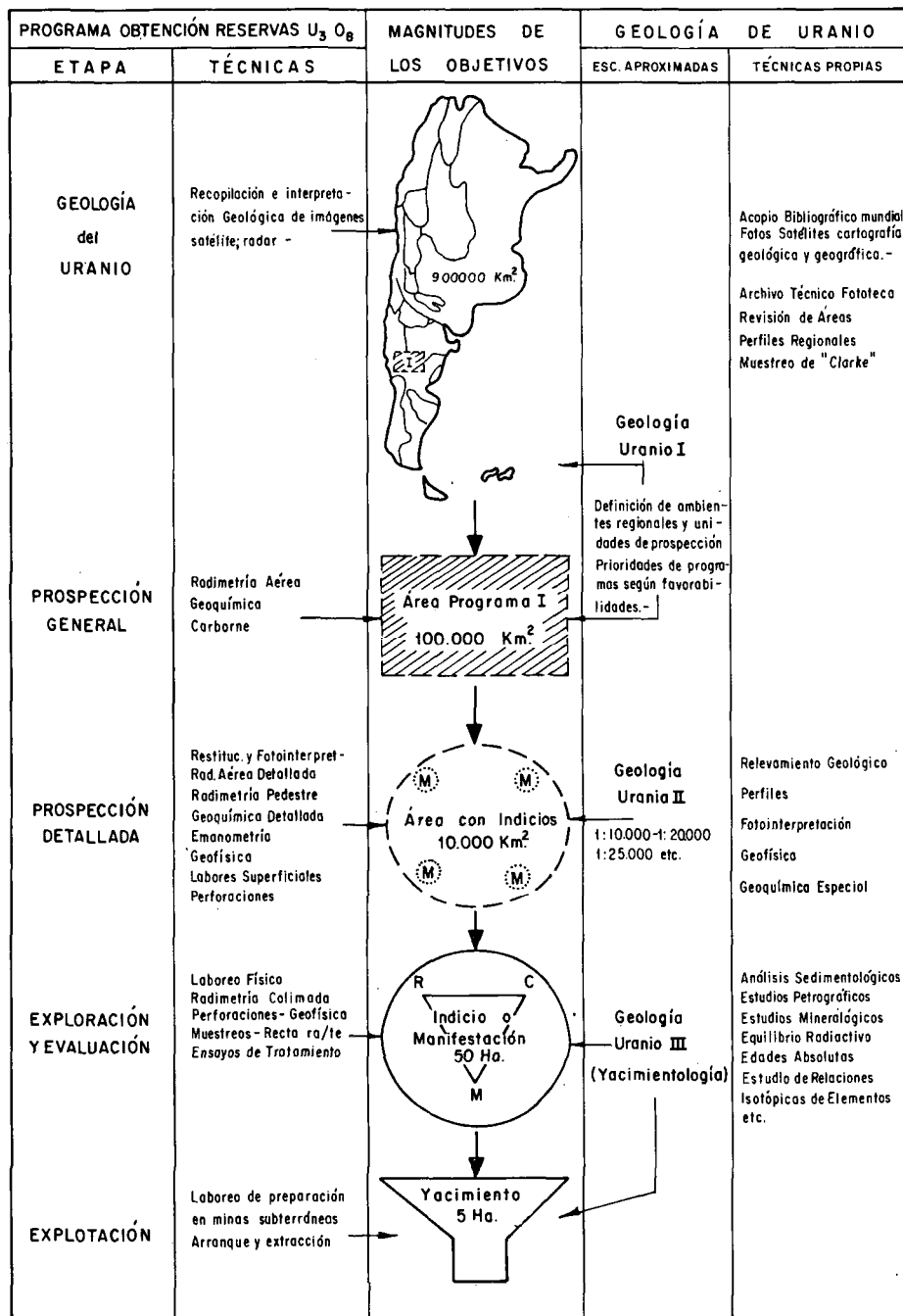


FIG. 3. Etapas en la prospección, exploración y evaluación de recursos uraníferos en la Argentina.

Sobre estas Unidades se procede normalmente a una cuantificación de los parámetros de favorabilidad geológico—uranífera, con el objeto de lograr sus clasificaciones según categorías de importancia y posibilitar así un ordenamiento de sus prioridades a los efectos de la prospección.

Paralelamente a esa tarea, se analizan los métodos de prospección general que mejor se adaptan a las condiciones ambientales de cada unidad, lográndose contar así con una integración de todos los parámetros técnicos y antecedentes logísticos y de infraestructura necesarios para planificar el desarrollo de los programas nacionales de prospección.

La ejecución de las tareas de delimitación descritas — “Ambientes regionales” y “Unidades de prospección” — pueden comenzar a esbozarse en gabinete sobre bases geológicas a escalas aproximadas 1:1 000 000—1:2 000 000.

Esta etapa permite fijar los lineamientos generales y el primer encuadre geológico—uranífero del país, que sirve para planificar la segunda fase de verificaciones de campo, donde se analizan todos los parámetros que sirven a la cuantificación del Índice de favorabilidad geológico uranífera (IFGU) y los antecedentes generales para planificar la prospección (fisiografía, clima, recursos locales, etc.).

Todas las tareas detalladas caen en el primer rubro “Geología del Uranio I” primera etapa de las que la Dirección de Suministros Nucleares de la CNEA estima necesarias para la evaluación de los recursos uraníferos del país. Estas etapas cubren todas las tareas inherentes a la prospección, exploración y evaluación según se sintetiza en la Fig.3.

### 2.2.2. Estimación del IFGU de cada “Unidad de prospección”

Se utilizan para esta estimación los parámetros que rigen el ciclo geoquímico del uranio y todos los factores geológicos complementarios que participan en el control de sus depósitos, según los ambientes geológicos en que yacen.

En los Cuadros II y III se detalla cómo se han clasificado esos factores y cómo se ha cuantificado su participación en la estimación del IFGU de cada unidad litoestratigráfica presente en la “Unidad de prospección” a estudiar cuando ésta no ha registrado aún la presencia de indicios de uranio.

Las cifras que se obtienen de la valoración de cada unidad geológica son integradas y promediadas a nivel de cada “Unidad de prospección”, hasta obtener un valor IFGU para cada una de ellas (Cuadro IV).

Esta valoración posibilita en definitiva un ordenamiento de prioridades para la prospección de las Unidades delimitadas en el país, acorde a los valores alcanzados por sus IFGU.

La verificación de campo de los parámetros detallados se suele realizar mediante itinerarios geológicos regionales en las Unidades de prospección, que permiten depurar la información original de gabinete e introducir algunos

## CUADRO II. BASES PARA LA ESTIMACION DEL IFGU EN AMBIENTES SEDIMENTARIOS

(Modelos "en areniscas", peneconcordantes, "rolls", etc.)

Parámetros	Valoración parcial de favorabilidad uranífera	Cuantificación total máx.
Ambiente depositación	Sedimentos continentales { Fluviales 3,0	3,0
	{ Deltaicos 3,0	
	{ Lacustres 1,5	
	Sedimentos marinos { Marginales 2,0	
	{ Profundos 0,5	
	(Los valores no se adicionan)	
Litología	Tipo de roca (arenisca, calizas, etc.) 1,0	3,0
	Permeabilidad, cemento, etc. 0,5	
	Decoloración 1,0	
	Limonitización-hematitización 0,5	
	(Los valores pueden adicionarse)	
Estructuras sedimentarias	Entrecruzamientos (láminas largas, cortas, etc.)	1,0
	Canalizaciones	
Agentes reductores	Materia carbonosa vegetal Bitumen, H <sub>2</sub> S, pirita, etc.	2,0
Rasgos estructurales	Discordancias piso – techo	1,0
	Estructuras tectónicas	
	Buzamientos	
MAXIMO GRADO DE FAVORABILIDAD		10,00

resultados complementarios de registros radiométricos y de muestreos geoquímicos (agua, roca, aluvión, etc.).

De esta forma se comienzan a acumular nuevos parámetros de interés en la estimación final del IFGU, que permiten conocer diferencias de "background" formacionales, detectar eventuales indicios y delinear tentativamente los rasgos preliminares de la distribución de las áreas anómalas en el país.

CUADRO III. BASES PARA LA ESTIMACION DEL IFGU EN  
AMBIENTES IGNEOS Y METAMORFICOS

(Modelos en filones-vetas, intramagmáticos, etc.)

Parámetros	Valoración parcial de favorabilidad uranífera	Cuántificación total máx.
Ambientes	— Metamórficos	1,0
	— Volcánicos	3,0
	— Intrusivos	3,0
	(Valores no adicionables)	
Litología	— Rocas ígneas ácidas	3,0
	— Rocas ígneas mesosilíceas	3,0
	— Rocas ígneas básicas	1,0
	(Valores no adicionables)	
Rasgos estructurales	Grado de fallamiento, diaclasamiento, discordancias, metamorfismo	1,0
Asociaciones minerales y agentes reductores	Relaciones paragenéticas del U con otros metales. Presencia de piritas, H <sub>2</sub> S, etc.	1,0
Grado de meteorización	Alteraciones meteóricas, que pueden haber liberado U lábil, facilitando la circulación de soluciones portadoras, etc.	2,0
MAXIMO GRADO DE FAVORABILIDAD		10,00

Normalmente, esas anomalías cuentan con estudios que han permitido incorporarlas al Registro Nacional de Indicios y establecer sus clasificaciones metalogénicas, posiciones geocronológicas, metalotectónicas, parámetros físicos, etc., integrando importantes antecedentes que deben ser incorporados a la estimación del IFGU de las unidades geológicas portadoras de la mineralización y de las Unidades de prospección donde yacen esas anomalías.

Estas situaciones hacen notoria la necesidad de introducir “parámetros uraníferos” en la valoración del IFGU, fundado hasta ahora en apreciaciones principalmente geológicas, clasificando para ello la participación que compete a parámetros tales como la radiometría, la geoquímica, la presencia de anomalías, etc.

En una primera aproximación se estima conveniente incorporar las siguientes modificaciones al cuadro original de cálculo del IFGU (Cuadro V).

Para los ambientes sedimentarios:

- a) Se mantienen los parámetros de “valoración geológica” del cuadro original según detalle:
- Ambiente depositación
  - Litología
  - Estructuras sedimentarias
  - Agentes reductores
  - Rasgos estructurales regionales,
- pero se le adjudica a cada parámetro un valor máximo de favorabilidad de 1,0, con lo cual el mayor grado de la cuantificación geológica alcanzaría una cifra de 5,0.
- b) Se propone incorporar los siguientes nuevos parámetros de “valoración uranífera”.
- Radiometría: Se calcularán estadísticamente la “mediana y el desvío tipo” de los registros radiométricos puntuales o continuos (autoportada) obtenidos sobre los itinerarios regionales de verificación de campo.
  - Geoquímica: Se calcularán la “mediana” y el “desvío tipo” sobre los muestreos geoquímicos de aproximación regional, que se realicen durante los itinerarios antes citados.
  - Antecedentes de anomalías e indicios: Se considerarán aquí las eventuales anomalías de uranio que se conocen en las unidades en estudio o son descubiertas con los itinerarios antes expuestos.

El análisis de los valores de las distintas “medianas”, “desvíos tipo” y presencia de anomalías permitirán evaluar el casillero general de “valoración uranífera”, pudiendo alcanzar el mismo hasta un valor máximo de 5,0.

De este modo las estimaciones “geológica” y “uranífera”, podrían alcanzar sendos valores máximos de 5,0 y su consideración conjunta llegar eventualmente al máximo grado de favorabilidad de 10,00 para la unidad geológica que se evalúa.

Para los ambientes ígneos:

- a) Se mantienen los parámetros de “valoración geológica” del cuadro original según detalle:
- Ambiente
  - Litología
  - Estructuras tectónicas,
- cuya cuantificación final se estima que puede llegar a una suma máxima de 5,0.
- b) Se aconseja incorporar los mismos parámetros de “valoración uranífera” ya expuestos para los ambientes sedimentarios.

CUADRO IV. MODELO PARA EL CALCULO DEL IFGU EN UNIDADES DE PROSPECCION SIN ANTECEDENTES URANIFEROS

Km<sup>2</sup>

I-AMBIENTE SEDIMENTARIO												
EDAD	Unidad Geológica	A- PARAMETROS Ambiente	GEOLÓGICOS Litología	URANIFEROS Estruct. Sediment.	Ag. Reductores	Estruct. Regionales	E	Km <sup>2</sup> A B	A x B	Altura E B	Espeesor m.	Observaciones
CENOZOICO	Terciario											
MESOZOICO	Cretácico											
PALEOZOICO	Devónico											
SUB TOTALES Y GRADOS DE FAVORABILIDAD PARCIAL DEL AMBIENTE SEDIMENTARIO												
II-AMBIENTE IGNEO-METAMORFICO												
EDAD	Unidad Geológica	A1- PARAMETROS Ambiente	GEOLÓGICOS Litología	URANIFEROS Estruct. Tectónica	Asoc. Minerales	Anom. Radio Uranio	E	Km <sup>2</sup> A1 B1	A1 x B1	Altura E B1	Espeesor m.	Observaciones
CENOZOICO	Terciario											
MESOZOICO	Jurásico											
PALEOZOICO	Devónico											
SUB TOTALES Y GRADOS DE FAVORABILIDAD PARCIAL DEL AMBIENTE IGNEO-METAMORFICO												
III RASGOS GENERALES PARA DEFINIR TIPO DE PROSPECCION												
RELIEVE		ALTURA m.		ACCESO	CLIMA	HIDROLOGIA	COBERTURA MODERNA	TIPO de Prospección ACONSEJADA				
		Maxima	Minima									

# CUADRO V. MODELO PARA EL CALCULO DEL IFGU EN UNIDADES DE PROSPECCION CON ANTECEDENTES URANIFEROS

Unidad de Prospección..... Km  
Sector..... Km

1º AMBIENTE SEDIMENTARIO:

Unidad Litológica Estratigráfica	"A" PARAMETROS GEOLOGICOS					Σ	"B" PARAMETROS URANIFEROS										Σ	Σ A+B C	Km² D	C+D E	EXD	Espesor m.	Observaciones
	Ambiente	Litología	Estructuras Sedimentarias	Agentes Reductores	Estructuras Aluviales		Químico		Geológico				Suelo		Presencia Indicador Químico Litológico								
							C. P. S.	Agua sub. superficial	Suelo sub. superficial	Suelo superficial	Suelo profundo	Suelo muy profundo	Suelo muy profundo	Suelo muy profundo									
SUB TOTALES Y GRADO DE FAVORABILIDAD DEL AMBIENTE SEDIMENTARIO																							

2º AMBIENTE IGNEO:

Unidad Litológica Estratigráfica	"A" PARAMETROS GEOLOGICOS			Σ	"B" PARAMETROS URANIFEROS										Σ	Σ A+B C	Km² D	C+D E	EXD	Espesor m.	Observaciones		
	Ambiente	Litología	Estructuras Ectónicas		A	Químico		Geológico				Suelo		Presencia Indicador Químico Litológico									
						C. P. S.	Agua sub. superficial	Suelo sub. superficial	Suelo superficial	Suelo profundo	Suelo muy profundo	Suelo muy profundo	Suelo muy profundo										
SUB TOTALES Y GRADO DE FAVORABILIDAD DEL AMBIENTE IGNEO																							

TOTALES GENERALES Y GRADO DE FAVORABILIDAD FINAL DE LA UNIDAD DE PROSPECCION															D+D'	E+E'	(E+E')%(D+D')

3º RASGOS GENERALES PARA ASEGURAR METODOS DE PROSPECCION

RELIEVE	ALTURAS		ACCESOS	CLIMA	HIDROLOGIA	COBERTURA	OBSERVACIONES	Tipo Prospección aconsejada
	Máximo	Mínimo						

Completada la estimación de los IFGU a nivel de las “Unidades de prospección” del país, se está en condiciones de establecer una clasificación de las mismas a fin de integrar un Cuadro de ordenamiento de prioridades para el Plan Nacional de Prospección.

La definición de los niveles de corte del IFGU, a fin de establecer la clasificación y ordenamiento antes descrito, responde a lineamientos técnicos, económicos y políticos de cada país.

### *2.2.3. Análisis y clasificación de las anomalías de uranio. Registro nacional de anomalías*

Cuando en el país existen anomalías e indicios de uranio, se procede a su estudio mediante reconocimientos en superficie y en profundidad, a fin de fijar las condiciones de yacencia geológica y los parámetros de la mineralización.

En Argentina esta etapa se llama “Prospección detallada” (Fig.1) y en ella se integra una serie completa de tareas normalizadas: relevamientos topográfico-geológicos, levantamientos radiométricos a mallas regulares, apertura de trincheras, estudios litológicos de detalle, muestreos, ejecución de algunos sondeos, etc. que permiten caracterizar el fenómeno mineralizador, los controles de su yacencia y sus parámetros generales (largo, ancho, espesor, leyes, etc.).

Los resultados de estos estudios se vuelcan en planillas normalizadas que, convenientemente clasificadas y ordenadas, pasan a integrar el Registro nacional de indicios y yacimientos de uranio en Argentina.




La información de ese Registro permite ordenar los Planes de exploración del país y establecer sus prioridades. Paralelamente sirven al mejoramiento de la evaluación de los IFGU de sus Unidades de prospección.

A su vez, con esa información es factible realizar una serie de síntesis y extrapolaciones a nivel nacional, a fin de:

- Definir las principales épocas metalogénicas de uranio en el país (edad roca portadora, edad de la mineralización).
- Identificar los modelos metalogénicos predominantes.
- Extrapolar las perspectivas de repetición de yacencia de esos modelos en el ámbito regional de la unidad geológica portadora. Ello permite mejorar la valoración de sus IFGU y posibilita la estimación de los “recursos especulativos” de uranio.

Todos los indicios del citado Registro se suelen identificar con símbolos que definen sus modelos metalogénicos, importancias, edad de la roca portadora, etc. (Cuadro VI) y permiten su graficación en planimetrías geológicas, donde se hallan delimitados los Ambientes y Unidades de prospección, a fin de ir complementando la estimación de sus IFGU y el conocimiento de la distribución y condiciones de yacencia del uranio en el país.

# CUADRO VI. SIMBOLOS PARA IDENTIFICACION DE INDICIOS Y YACIMIENTOS DE URANIO SEGUN MODELOS DE YACENCIA

HABITO DE YACENCIA	SIMBOLO UTILIZADO	CARACTERISTICAS A LLENAR EN LOS CASILLEROS MEDIANTE COLORES Y SIMBOLOS COMPLEMENTARIOS
SEDIMENTARIO PENECONCORDANTE A LA ESTRATIFICACION. —		<p>CADA UNO DE LOS CASILLEROS SEPARADOS EN EL SIMBOLO SE LLENARA SEGUN LOS SIGUIENTES DATOS.</p> <p>Casillero a :  LITOLOGIA ROCA PORTADORA  { COLOR ROJO : SEDIMENTOS CONTINENTALES CLASTICOS { Ar : ARENISCAS  { COLOR AZUL : IDEN MARINOS PROFUNDOS { Cg : CONGLOMERADOS  { Pe : PELITAS  { Tu : TUPOS  { Pen : PELITAS NEGRAS  { Cal : CALIZAS</p> <p>Casillero b :  EDAD ROCA PORTADORA  { PRECAMBRICO : ROJO — Pre-C { Cam : CAMBRICO  { PALEOZOICO : AZUL { Or-Si : ORDOVICICO-SILURICO  { De : DEVONICO  { Ca : CARBONICO  { Per : PERMICO  { MESOZOICO : VERDE { Tr : TRIASICO  { J : JURASICO  { K : CRETACICO  { CENOZOICO : AMARILLO { T1-Tm-Ts : TERCIARIO INFERIOR MEDIO Y SUPERIOR  { Q : CUATERNARIO</p> <p>Casillero c :  EDAD Y TIPO DE LA MINERALIZACION  { E : EPIGENETICA  { S : SINGENETICA  { ETC.</p> <p>Casillero d :  IMPORTANCIA DEL INDICIO O YAC. { SE IDENTIFICAN CUATRO NIVELES DE IMPORTANCIA CON NUMEROS DE 1 a 4</p> <p>DEBAJO DEL SIMBOLO ENTRE PARENTESIS SE IDENTIFICARA EL NIVEL DE LA EXPLORACION EJECUTADA :</p> <p>LS : LABORES SUPERFICIALES { 1 HASTA 200 m.  LP : LABORES PROFUNDAS { 2 HASTA 500 m.  { 3 MAS DE 500 m.  S : SONDEOS { 1 HASTA 500 m.  { 2 HASTA 2,500 m.  { 3 MAS DE 2,500 m.</p>
"FILONIANO" O "VETIFORME"		<p>SE PROCEDERA EN IGUAL FORMA QUE EN EL CASO ANTERIOR PARA EL LLENADO DE LOS DISTINTOS CASILLEROS :</p> <p>Casillero a : LITOLOGIA ROCA PORTADORA  { COLOR ROJO : SEDIMENTOS  { COLOR AZUL : IGNEAS INTRUSIVAS { Ac : ACIDAS  { COLOR VERDE : IGNEAS EFUSIVAS { Ne : MESOSILICA  { COLOR AMARILLO : METAMORFITAS { Ba : BASICAS</p> <p>Casillero b : IDEN A RUBRO (b) MODELO ANTERIOR  " c " " " (c) " "  " d " " " " " "</p>
"DISEMINADO" O INTRAMAGMATICO		LOS CASILLEROS SE LLENARAN SEGUN DETALLE CASO ANTERIOR

### 2.3. Resultados alcanzados con la aplicación de la metodología propuesta

En función de la aplicación integrada de todos los argumentos expuestos se ha logrado alcanzar en Argentina un adecuado nivel de conocimientos sobre la favorabilidad geológico—uranífera del país, delimitar y cuantificar el IFGU de sus “Unidades de prospección”, establecer las condiciones geológicas que controlan la yacencia de los yacimientos conocidos, lograr la evaluación de sus reservas y estimar los recursos especulativos nacionales.

Las sucesivas etapas seguidas para alcanzar ese desarrollo se sintetizan como sigue:

#### 2.3.1. *Geología del Uranio I. Delimitación de unidades de trabajo*

Estos estudios constituyeron la fase inicial de las etapas de trabajo para la evaluación de las materias primas nucleares de Argentina (Fig.3).

Su aplicación permitió delimitar 21 “Ambientes regionales” y 65 “Unidades de prospección”, estimar las perspectivas de sus favorabilidades geológico—uraníferas, clasificar sus importancias y ordenar sus prioridades a los efectos de su consideración en la elaboración del Plan Nacional de Prospección General.

El alcance de esos objetivos se expone a continuación:

##### 2.3.1.1. Delimitación de Ambientes geológico—uraníferos regionales

Se delimitaron 21 Ambientes de esta naturaleza con una superficie total de 961 320 km<sup>2</sup>. De los mismos, 18 (841 320 km<sup>2</sup>) se ubican en el ámbito del territorio continental, y los otros 3 (120 000 km<sup>2</sup>) cubren las regiones insulares y la Antártida argentina (Fig.4).

En general, los 18 Ambientes del territorio continental se corresponden con las principales unidades morfoestructurales del país, y para su delimitación se han evaluado sus condiciones litoestratigráficas, de evolución geotectónica, y eventual presencia de los parámetros que participan en el “ciclo geoquímico del uranio” y rigen la yacencia de los modelos metalogénicos mundiales de ese elemento.

La Fig.2 revela la clasificación y ordenamiento original de prioridades de esos “Ambientes” (año 1972), situación que aún no se ha modificado, pues los nuevos ordenamientos y su permanente adecuación a los conocimientos y evolución de la Geología del Uranio I en el país se han continuado a nivel de las “Unidades de prospección”.

En el detalle siguiente se consignan los principales caracteres geológicos y apreciaciones sobre la favorabilidad uranífera de los 15 principales Ambientes regionales del país.

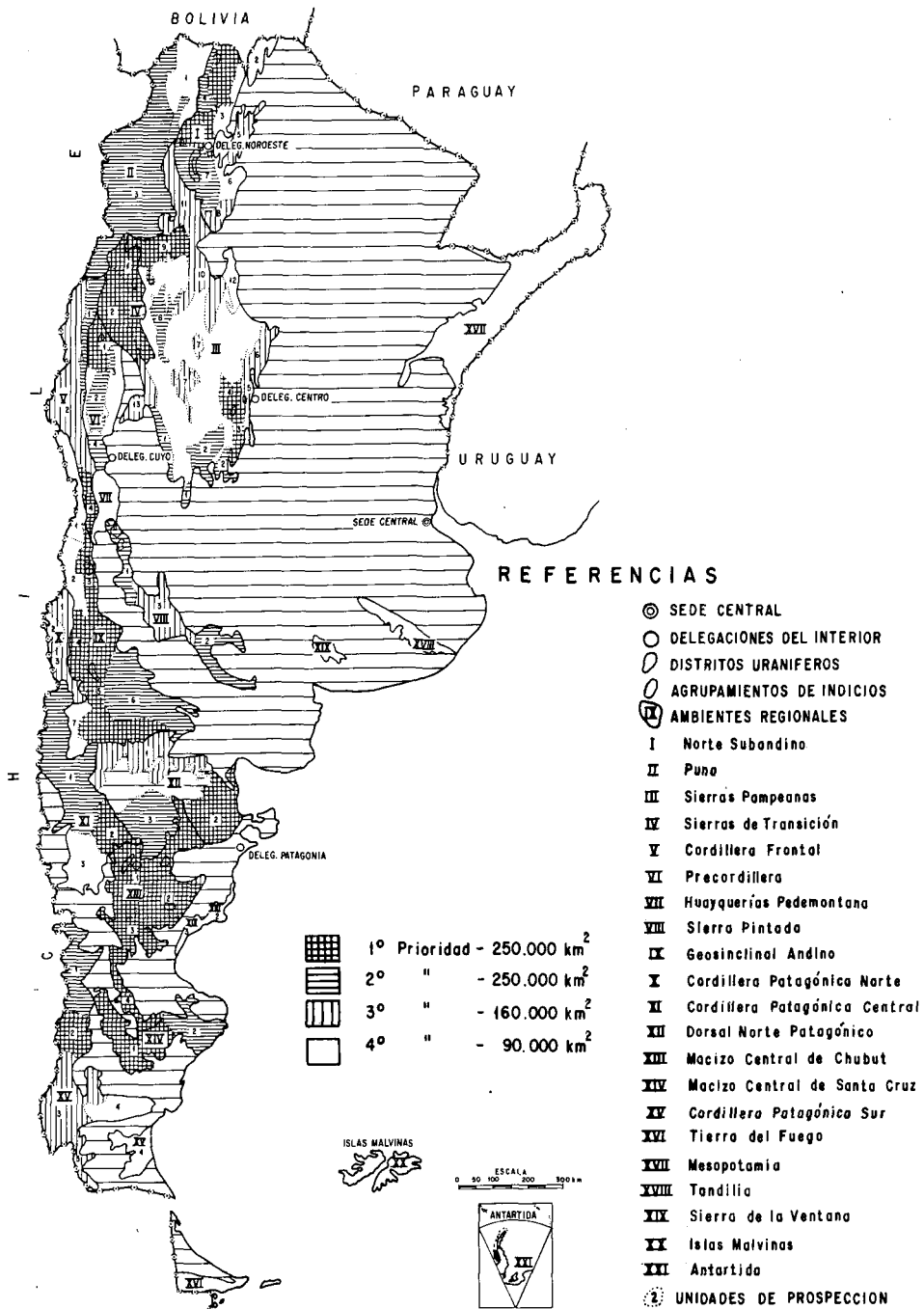


FIG.4. Ubicación de Ambientes regionales y prioridades de las Unidades de prospección.

— *Ambiente regional I. Norte subandino (70 450 km<sup>2</sup>)*

Está integrado por dos unidades morfológicas: las Sierras Subandinas y la Cordillera Oriental, que constituyen sendas prolongaciones australes de similares entidades morfoestructurales de Bolivia.

El cuadro estratigráfico del Ambiente se inicia en ambos casos con un basamento precámbrico integrado por metamorfitas de bajo grado, intruídas por una serie magmática ácida, sobre las que se apoyan en discordancia una potente secuencia eopaleozoica (Silúrico-Devónico) de sedimentitas marinas de flysch y plataforma y eventuales depósitos diamícticos del Carbónico. La favorabilidad uranífera de esta secuencia es de mediano valor estimándose factible la presencia de depósitos de "hábito filoniano" (corroboran esta apreciación la presencia de anomalías de este modelo: Yac. La Esperanza; Quirusillal, Lama Pampa, etc., Pcia. de Salta).

La secuencia expuesta continúa con sedimentos marinos marginales y de plataforma del grupo Salta (Cretácico Superior) depositados en un mar epicontinental poco profundo que ingresó desde el norte. Areniscas, pelitas y calcáreos integran este grupo, algunas de cuyas formaciones geológicas (Yacoraite, etc.) acusan la existencia de numerosas anomalías y presencia de dos distritos uraníferos con yacimientos económicos de uranio sobre hábitos peneconcordantes (distritos Tonco, Pampa Grande, etc., Pcia. Salta). Estas condiciones favorables se manifiestan en una faja anómala de casi 250 km de longitud N-W/S.E. y unos 10–15 km de ancho que ocupa todo el borde occidental de esa cubeta, marginada en ese borde por un área de aporte fértil representada por granitos paleozoicos con contenidos variables y elevados de uranio lábil.

Esos mismos granitos poseen interesantes perspectivas de presentar yacimientos de tipo intramagmático, aún no explorados.

Completa el cuadro estratigráfico un potente espesor de sedimentos terciarios de tipo molásico continental que cubre gran parte de la zona oriental de este ambiente. Por sus condiciones litológicas y parámetros de favorabilidad uranífera constituye una secuencia de limitadas perspectivas para ubicar yacimientos del tipo "uranio en areniscas". Se conocen en estos sedimentos algunos indicios de hábito peneconcordante, en niveles clásticos fluviales con presencia de materia carbonosa vegetal (Peñas Bajas, Río Negrito, etc., Pcia. Jujuy).

Las perspectivas de explotación del Ambiente, a los fines de la prospección general, son de regular a baja favorabilidad, pues existen condiciones que dificultan esas tareas (cobertura vegetal de bosques en algunos sectores, fisiografía abrupta en otros) y, en ciertos casos, limitadas posibilidades de apoyo logístico.

— *Ambiente regional II. Puna (60 590 km<sup>2</sup>)*

Constituye la continuidad sur de una entidad morfológica mayor que se inicia en el sur del Perú con la región de Puno, continúa con el Altiplano de Bolivia y culmina en la Puna argentina. Se extiende desde los 21°45' hasta los 26°45' de latitud sur con una longitud de unos 600 km y un ancho de 250 km. Fisiográficamente se corresponde con un área sobreelevada a unos 3800 m de altura, con una superficie más o menos plana sobre la que se elevan cordones montañosos de 1000 a 2000 m con dirección general N-S y una red hidrográfica centrípeta que suele terminar en amplias cuencas cerradas donde se desarrollan importantes depósitos evaporíticos. El clima es riguroso, seco y frío aun en verano y con condiciones de notoria aridez. El apoyo logístico y de infraestructura local es escaso. Dos complejos litológicos distintos: metamorfitas de bajo a mediano grado y rocas graníticas asignadas en ambos casos al Precámbrico afloran en este Ambiente, constituyendo el substrato de una secuencia de sedimentitas marinas del Eopaleozoico ya descritas en el Ambiente I. La columna litoestratigráfica se completa con sedimentitas marinas cretácicas y depósitos continentales clásticos del Terciario a los que en este caso se deben sumar importantes series volcánicas ácidas y mesosilíceas hasta básicas del Cenozoico. La favorabilidad uranífera de este ambiente, poco prospectado por sus condiciones geográficas y de apoyo logístico, es de interés por la existencia de importantes "áreas de aporte" (granitos precam., paleozoicos y vulcanitas ácidas) y amplias regiones favorables para la recepción y precipitación del uranio movilizado. Los modelos de depósitos previsibles de ubicar corresponden a los de hábito peneconcordante en sedimentitas cretácicas, terciarias, etc. (donde ya se conocen anomalías: indicio Aguiliri, Pcia. Jujuy), o a los "filonianos" epigénicos o "amás" en las mismas rocas fértiles.

— *Ambiente regional III. Sierras Pampeanas (111 990 km<sup>2</sup>)*

Está constituido por serranías bajas (1500–2000 m) hasta cadenas montañosas de alturas superiores a los 200–2500 m, que con arrumbamiento general submeridional se levantan, como resultante de una tectónica de fallamiento y estructura de bloques basculados, desde las llanuras pampásicas. Tienen una longitud de 900 km N-S y un ancho de 150 hasta 300 km. Las serranías suelen culminar en altiplanos elevados (pampas) correspondientes a las antiguas penillanuras de erosión. Numerosas cuencas cerradas en el área central reflejan las condiciones climáticas semiáridas del ambiente, lo que no permite en general el desarrollo de una red hidrográfica definida. El substrato está constituido por metamorfitas de alto grado (migmatitas hasta series anatécicas) y sedimentitas con un nivel de metamorfismo regional, a las que se asigna una edad precámbrica a eventual eopaleozoica. El conjunto está intruido por plutones graníticos y

granodioríticos con algunos cuerpos intrusivos básicos a los que se adjudica una edad eopaleozoica, especialmente devónica. Los granitos han estado muy expuestos a la erosión y algunos batolitos muestran fertilidad uranífera.

En esos granitos se han ubicado numerosas manifestaciones uraníferas, constituyendo interesantes distritos como los de “Comechingones” (modelo de depósito epigénico con hábito filoniano) y “Los Gigantes” (modelo de depósito de “dispersión”), lo que confiere a todos sus amplios afloramientos en este ambiente una elevada favorabilidad.

A su vez, las metamorfitas de alto grado intruídas por esas rocas ígneas no se consideran muy favorables, pese a conocerse ocasionales impregnaciones de uranio en las antiguas superficies de meteorización hoy exumadas. El zócalo descrito está cubierto sobre un plano de discordancia regional por una potente sucesión de molásas continentales del tipo bancos rojos, que solo han sufrido plegamientos suaves y fracturación en bloques. Esta secuencia deposicional se inicia en el Carbónico (Paganzo I) con sedimentitas clásticas fluviales grises (areniscas y conglomerados) e intercalaciones de pelitas oscuras carbonosas de planicie de inundación o lacustres.

El ciclo continúa con sedimentos de edad pérmica (Paganzo II), areniscas, conglomerados y pelitas rojas, que indican un cambio climático con aridez y condiciones netamente oxidantes, para culminar la secuencia con depósitos similares de edad triásica (Paganzo III) dispuestos en cuencas menores dentro de la amplia cubeta regional del Paganzo. Perturbaciones tectónicas produjeron en el Mesozoico Superior cuencas locales rellenas durante el Cretácico con sedimentitas clásticas e intercalaciones de un vulcanismo de plataforma (basáltico).

La favorabilidad uranífera de esas sedimentitas continentales está regida por el esquema paleogeográfico que define la fertilidad probable de sus áreas de aporte y el paleohidrológico que establece la transmisibilidad de las soluciones portadoras del ión uranilo.

Se han detectado manifestaciones en modelos “uranio en areniscas” en las capas basales Carbónico – Paganzo I (distrito Los Colorados, Pcia. de Córdoba) especialmente en los sectores en que éstas se asientan sobre granitos eopaleozoicos muy alterados. Las capas del Permotriásico (Paganzo II) también poseen buenas condiciones geológicas pero hasta la fecha solo se han ubicado algunas anomalías aisladas sin interés económico. Las sedimentitas cretácicas no presentan indicios, aunque debe aclararse que no han sido prospectadas sistemáticamente.

Sobre el conjunto anterior, y localizadas en depresiones erosivas o tectónicas elaboradas por fases de la orogenia andina, se ubican sedimentitas clásticas continentales terciarias (conglomerados, areniscas, pelitas, calcáreos). Esas secuencias contienen manifestaciones uraníferas lenticulares y mantiformes derivadas del aporte de los granitos paleozoicos fértiles que constituyeron los bordes de dichas depresiones e integraron las áreas que dieron el material para su rellenamiento (distrito Cosquín – yacimiento Rodolfo, etc. en la Pcia. de Córdoba).

— *Ambiente regional IV. Sierras de Transición (22 300 km<sup>2</sup>)*

Se ubica entre los ambientes de la Puna, las Sierras Pampeanas y la Precordillera y Cordillera Frontal desde los 27°20' hasta 30°20' de latitud sur. Posee una longitud de unos 350 km y un ancho variable de 80 a 120 km. Está integrado por una serie de cordones montañosos (sistema del Famatina) de dirección submeridional y alturas que superan los 5000 m, y presenta un relieve juvenil muy elaborado y sumamente escabroso, lo que dificulta la prospección.

Su denominación se debe a que en su constitución se integran unidades geológicas que tipifican a las Sierras Pampeanas por un lado y a la Precordillera por el otro, constituyendo un verdadero ambiente transicional o de engranaje geológico.

Presenta un basamento metamórfico magmatítico sobre el que se han depositado series sedimentarias marinas del Paleozoico Inferior, especialmente ordovícicas y devónicas, a veces levemente metamórficas por contacto intrusivo de granitos constituyentes de batolitos apotectónicos.

Estos granitos muestran indicios de fertilidad, y en algunos restos de colgajos de sus cúpulas los esquistos presentan mineralización uranífera epigénica en modelos de dispersión y hábitos vetiformes (yacimientos San Sebastián y satélites en la Pcia. de la Rioja).

Sobre el conjunto intruído siguen algunas secuencias efusivas y sedimentitas con las que culmina el Devónico. Las posibilidades uraníferas de las series descritas están condicionadas por sus relaciones temporoespaciales entre las masas graníticas de la Sierra que constituyen áreas de aporte fértiles, y la cubierta sedimentaria continental discordante que cubre ese zócalo. Esta cubierta está principalmente representada por sedimentitas clásticas del tipo bancos rojos, de gran difusión en las zonas centrales y occidentales del país (grupo del Paganzo) englobando depósitos carbónicos, pérmicos y en menor grado triásicos.

En los niveles basales presenta manifestaciones peneconcordantes en conglomerados y areniscas gruesas con abundante materia orgánica vegetal carbonizada (sur de la Sierra de Sañogasta) y existencia de depósitos lenticulares peneconcordantes en pelitas pérmicas (distrito Tinogasta, Pcia. Catamarca). Estas manifestaciones son consideradas como indicativas de posibilidades interesantes para el ámbito regional de este ambiente.

Por encima de los niveles paleozoicos se asientan sedimentos clásticos, continentales cenozoicos que poseen favorables condiciones para contener yacimientos de uranio. Se han ubicado algunas anomalías en esas sedimentitas terciarias con modelos comparables a los clásicos yacimientos mundiales de "uranio en areniscas" (La Agüita en la Pcia. de La Rioja).

— *Ambiente regional V. Cordillera Frontal (38 000 km<sup>2</sup>)*

Se corresponde con una larga cadena montañosa compuesta por numerosos cordones y macizos que se inician en los 28° de latitud sur y se prolongan hasta los 36° 46'. Su longitud es de unos 700 km N-S y su ancho máximo de 85 km E-O. Su límite oriental son los valles intermontanos que lo separan de la Precordillera y el occidental, la Cordillera principal de Los Andes.

Su morfología es la que tipifica las altas cordilleras en niveles de 5000 a 6000 m, con un relieve juvenil escabroso. El clima es árido y riguroso en invierno y el ambiente ha sido poco prospectado por las dificultades geográficas y logísticas que encierra.

La constitución geológica está definida por la presencia de un substrato de metamorfitas eopaleozoicas y sedimentitas marinas poco metamorfizadas del Paleozoico Medio. Sobre ellas se disponen sedimentitas marinas del Carbónico correspondientes a facies flyschoides.

Una importante secuencia ígnea con plutonitas y vulcanitas ácidas a mesocilíceas de edad permotriásica intruyen el basamento paleozoico y se consituyen en las más importantes unidades de favorabilidad uranífera del Ambiente por sus condiciones de "área de aporte fértil con uranio lábil". En ese ámbito se han ubicado anomalías de uranio epigénico con hábitos filoneanos en grietas, fracturas, etc., de los grañitos (anomalías Fernanda, Gladys, etc., en la Pcia. de San Juan).

Este conjunto constituye el eje vertebral de la constitución geológica de este ambiente, el cual se completa con sedimentitas continentales clásticas cenozoicas depositadas en cuencas intermontáneas con buena favorabilidad como áreas de recepción y precipitación del uranio (modelo metalogénico probable: uranio en "anreniscas").

— *Ambiente regional VI. Precordillera (27 550 km<sup>2</sup>)*

Unidad estructural que se extiende a ambos lados del meridiano 69°0 con una longitud de más de 400 km desde los 29° hasta los 33° de latitud sur, donde se hunde bajo una espesa serie sedimentaria cenozoica. Su ancho máximo es del orden de 90 km. Sus alturas disminuyen de norte a sur pasando de unos 5000 m a 2500 m. El clima es árido y semidesértico. Existen aceptables condiciones de apoyo logístico. Está constituida por numerosos cordones de rumbo submeridional y limita: al O con la Cordillera Frontal, de la cual la separan valles intermontáneos, y al E con una serie de amplias depresiones que la separan de las Sierras Pampeanas.

Bajo el punto de vista de su desarrollo geotectónico se debe interpretar esta unidad como un típico ciclo de evolución geosinclinal que se inicia en el Eopaleozoico y culmina en el Triásico.

Litoestratigráficamente componen su columna geológica, sedimentos marinos paleozoicos desde el Cámbrico al Devónico (facies vacuidad y flysch) y depósitos continentales molásicos del Carbónico al Pérmico. El conjunto ha sido afectado por las distintas orogenias que culminan con los movimientos de la fase Varísica, con plegamientos y elevaciones de bloques y cuyo magmatismo conexo se traduce en importantes intrusiones y efusiones volcánicas ácidas y mesosilíceas. Sedimentitas y efusivas, triásicas ácidas completan este cuadro antes del comienzo del gran hiato Jurásico – Cretácico.

La secuencia estratigráfica se reinicia con los sedimentos terciarios continentales (moladas clásticas y piroclásticas) que ocupan preferentemente posiciones marginales de la Precordillera y rellenan algunos bolsones intermontáneos.

El diastrofismo del Terciario Superior actuó modelando el relieve viejo con un acentuado predominio de una tectónica de fracturación, especialmente de fallas inversas, que elevaron algunos bloques a más de 3000 m. El magmatismo correspondiente se manifiesta en esta unidad con un desarrollo restringido.

La buena favorabilidad geológico—uranífera de este ambiente se debe a la presencia de “áreas de aporte fértiles” (intrusivas y vulcanitas ácidas del Permotriásico) donde se ubicaron numerosas anomalías en hábitos epigénicos filonianos (Cerro Cacheuta, Puntudo, etc.) etc., y “áreas de recepción” con parámetros geológico—uraníferos de buena favorabilidad (sedimentitas clásticas continentales carbónicas, pérmicas, triásicas y terciarias) donde se han ubicado algunas anomalías e incluso yacimientos potenciales con hábitos peneconcordantes en el modelo “uranio en areniscas” (Distrito Guandacol, Médano Rico, La Moquinera, etc., en las Pcias. de la Rioja y San Juan).

#### — *Ambiente regional VII. Huayquerías pedemontanas (8000 km<sup>2</sup>)*

Se ubica constituyendo el área pedemontana que baja desde la Cordillera Frontal y liga geográficamente este ambiente con la parte austral de la Precordillera (Ambiente VI) y el extremo norte de la Sierra Pintada (Ambiente VIII). Morfológicamente se corresponde con un relieve de amplio abanico pedemontano con un substrato terciario afectado por una neotectónica cuartaria, la que origina, con un sistema de fracturación N-S, algunos bloques que se elevan hasta 800—1000 m de altura.

El paisaje muestra un típico relieve de “huaicos”, producto de una activa erosión de arroyamiento en clima árido sobre sedimentitas continentales clásticas terciarias que prácticamente cubren todo el ámbito de este Ambiente. Su favorabilidad geológico—uranífera se estima baja, pues, si bien tendría un área de aporte fértil en las vulcanitas e intrusivas ácidas (permotriásicas) de la Cordillera Frontal, no se han registrado en las sedimentitas terciarias los parámetros clásicos que indiquen un aceptable IFGU.

— *Ambiente regional VIII. Sierra Pintada (35 000 km<sup>2</sup>)*

Se ubica entre los paralelos 34° y 39° de latitud sur y se proyecta sobre una longitud de 700 km NO-SE y un ancho máximo de 50 km EO. Está constituido por serranías y bloques que con alturas de hasta 1500 m se elevan sobre las zonas deprimidas y llanas que lo rodean y separan, al oeste de la Cordillera Principal y al este de las Sierras Pampeanas australes. Constituye en esencia la continuidad austral desconectada de la Precordillera (Ambiente VI). Su clima es árido y semidesértico y posee buenas condiciones de apoyo logístico.

Geológicamente presenta un “basamento” con afloramientos muy locales de metamorfitas y calizas a las que se atribuyen edades precámbrica y cámbrica respectivamente. El sustrato regional aflorante está representado por metamorfitas de edad devónica sobre las que se apoyan sedimentitas de edad carbónica depositadas en dos ambientes distintos: marino (pelitas negras) y continental clástico (areniscas y pelitas grises). El ciclo continúa con sedimentos pérmicos de origen eólico y fluvial depositados en cuencas intermontanas locales con intercalaciones de vulcanitas mesosilíceas que hacia el Triásico culmina con un magmatismo volcánico ácido y mesosilíceo. La secuencia finaliza con depósitos molásicos continentales cenozoicos después de un amplio hiatus para todo el Jurásico-Cretácico.

La favorabilidad de este ambiente, donde se ubica la mayor reserva de uranio del país, vuelve a integrarse en la presencia de la cupla de optimización: áreas de aporte fértil (vulcanitas permotriásicas donde también se han ubicado anomalías de uranio de hábito filoniano y origen epigénico) y “áreas de precipitación” con parámetros favorables (sedimentos continentales pérmicos y carbónicos). En su ámbito se han ubicado decenas de anomalías y un Distrito uranífero de importancia (Sierra Pintada, Pcia. de Mendoza, con un modelo metalogénico de uranio epigénico peneconcordante en areniscas del Pérmico) donde yace la mayor reserva conocida a la fecha en el país.

— *Ambiente regional IX. Geosinclinal Andino (93 320 km<sup>2</sup>)*

Se extiende entre los 31° y 40' de latitud sur. Al oeste limita con el Valle Central de Chile y al este con la Cordillera Frontal y una larga faja de bolsones que la separan del bloque San Rafael y su prolongación austral. Integramos en este ambiente dos unidades morfológicas: la Cordillera de los Andes con cordones montañosos submeridionales que se elevan hasta los 4000–5000 m, y el “Neuquén extrandino” correspondiente a un amplio “plateau” con características mesetiformes y algunas unidades positivas bajas de no más de 1500 m de altura.

El clima general es árido desértico a semidesértico, con problemas logísticos y geográficos en la Cordillera y aceptables condiciones operativas en el Neuquén extrandino.

Sobre su zócalo eopaleozoico a triásico se asientan diferentes depósitos de geosinclinal que van desde el Jurásico Inferior al Cretácico Medio. En este lapso, sedimentos marinos de carácter batial a nerítico rellenaron cubetas generadas por hundimientos tectónicos y subsidencia, y algunos períodos locales de regresión determinaron la acumulación de sedimentitas clásticas continentales (Fm. Tordillo, etc.). Un ascenso regional afecta luego esta larga faja con depositación durante el Cretácico Medio de sedimentos transicionales y continentales (bancos rojos), a los que sigue una fase orogénica inicial (movimientos intersenonianos) y el emplazamiento del “Batolito Andino”.

Tras la depositación de sedimentitas y vulcanitas en el Senoniano, se produce el movimiento larámico de tipo compresivo, con fuertes corrimientos. Ya en el Terciario tienen lugar los movimientos andinos con fallamiento en grandes bloques y vulcanismos ácidos y mesosilíceos intensos. En este período geológico se desarrollan potentes depósitos sedimentarios intermontáneos. En el Cuartario se produce una elevación general de la Cordillera, acompañada de glaciaciones, depósitos de pie de monte y vulcanismos básicos. La favorabilidad uranífera se ubica especialmente en las secuencias sedimentarias a nivel de las molasas continentales (Jurásico: Fm. Tordillo, Lotena etc., y en especial Cretácico: Grupo Diamante) donde existen todos los parámetros para alcanzar un elevado IFGU y donde se han ubicado numerosas anomalías y distritos con yacimientos del modelo “Uranio en areniscas” (Distrito Malargue – Renquil – Co; Rahue – Co, Pcia. de Mendoza).

Las intrusivas ácidas neopaleozoicas y las vulcanitas permotriásicas y cenozoicas constituyen un aval complementario a esa elevada favorabilidad del ambiente dada su condición de áreas de aporte fértil y presunto origen del uranio precipitado en los depósitos cretácicos y jurásicos.

#### — *Ambiente X. Cordillera Patagónica Norte (16 500 km<sup>2</sup>)*

Comprende la faja cordillerana con cordones montañosos de hasta 3000 m de altura que se extiende desde los 36° 15' latitud sur hasta los 39° 05' y desde el límite con Chile hasta el pie occidental de la Cordillera del Viento.

Está constituido por un núcleo de rocas intrusivas mesosilíceas carbónicas cubiertas con efusivas de la serie profirítica permotriásica y en algunos sectores por vulcanitas cretácicas. Un intenso magmatismo se desarrolla durante todo el Terciario con vulcanismo ácido durante el Eógeno y algunas efusiones basálticas en el Neógeno y Cuaternario. En el sector austral existen algunos afloramientos aislados de sedimentitas jurásicas de facies marinas y en otras áreas afloran depósitos continentales clásticos terciarios correspondientes a rellenos intermontáneos locales. El ambiente ha sido poco prospectado y las perspectivas uraníferas se consideran medianamente favorables, fundadas en:

- Presencia de áreas de aporte fértil a nivel de las intrusivas mesosilíceas y efusivas permotriásicas y terciarias de tipo ácido;

Existencia de “áreas de precipitación favorables” en las sedimentitas continentales clásticas terciarias.

— *Ambiente XI. Cordillera Patagónica Central (63 000 km<sup>2</sup>)*

Se extiende entre los paralelos 38° 20' y 44° de latitud sur, y está constituido en su sector norte por la franja cordillerana propiamente dicha, en tanto que hacia el sur se expande incluyendo amplios sectores extrandinos. Las rocas más antiguas aflorantes son metamorfitas (Precámbrico) a menudo intruídas por granitos referidos al Eopaleozoico; sobre ellas se dispone, en las áreas extracordilleranas de Tecka — Tepuel, de sedimentitas marinas del Paleozoico Medio intruídas por graníticos neopaleozoicos. La columna litoestratigráfica continúa con depósitos marinos de edad jurásica que afloran en el sector sur del ambiente y a los que suceden vulcanitas mesojurásicas ácidas y mesosilíceas.

En los alrededores de Gastre (Pcia. Chubut) se han señalado depósitos continentales clásticos de edad cretácica correlacionables con el Grupo Chubut portador de uranio en el Ambiente XIII. En discordancia sobre esta secuencia aparecen extensos afloramientos de la serie andesítica eógena, rematados por extensas coladas basálticas terciarias y cuaternarias. Las perspectivas uraníferas del área se estiman de mediana favorabilidad con presencia de extensos plutones graníticos presuntamente fértiles y algunas regiones con sedimentitas continentales de litología favorable en las que eventualmente podrían haberse formado depósitos del modelo “uranio en areniscas”.

— *Ambiente regional XII. Dorsal Norte Patagónica (55 050 km<sup>2</sup>)*

Sus límites coinciden en grandes rasgos con el llamado Escudo Norpatagónico, formando parte de este ambiente los sectores centro-sur de la provincia de Río Negro y norte de Chubut.

Geológicamente está caracterizado por la presencia de metamorfitas eopaleozoicas y algunas referidas al Precámbrico, que alcanzan su mayor desarrollo en la Pcia. de Río Negro, intruídas por granitos a los que los autores asignan diferente edad. En el sector este del área encontramos sedimentitas marinas referidas al Silúrico — Devónico y algunas granodioritas asimiladas a un magmatismo post-silúrico.

Depósitos continentales triásicos han sido descritos en las inmediaciones de los Menucos. Vulcanitas ácidas mesosilíceas referidas a varios ciclos efusivos jurásicos cubren parcialmente los terrenos antes señalados. Se pueden reconocer afloramientos de sedimentos marinos y continentales cretácicos en el sector este del Ambiente. Productos de un intenso vulcanismo terciario (andesitas, riolitas y tobas asociadas) se registran en el norte de Chubut, y completan el

esquema geológico del Ambiente extensas coladas basálticas terciarias y cuaternarias.

Las perspectivas uraníferas se refieren especialmente a las áreas con intrusivas y vulcanitas ácidas presuntamente fértiles, donde se puede esperar ubicar depósitos de hábito “filoniano” o en “amás” y parcialmente en las zonas con sedimentitas continentales, las cuales suelen acusar parámetros favorables para eventual precipitación de uranio.

— *Ambiente regional XIII. Macizo Central del Chubut (72 420 km<sup>2</sup>)*

Sus límites norte y sur lo constituyen respectivamente el Escudo Norpatagónico y el área positiva del Deseado, en Santa Cruz; su límite oeste es la región cordillerana y hacia el este se extiende hasta la costa atlántica. Fisiográficamente el área está formada por un relieve de tipo mesetiforme de baja altura (500–1000 m s.n.m.), sobre el que se elevan serranías locales de hasta 500–1000 m de altura. El clima es árido con inviernos rigurosos típicos en la Patagonia argentina, pese a lo cual se puede trabajar todo el año.

Se trata fundamentalmente de una cuenca mesozoica rellena por depósitos continentales (vulcaníticos y clásticos) que culmina en el Cretácico Superior con una extensa ingresión atlántica (Grupo Salamanca). En el sector noroccidental del ambiente se registran algunos afloramientos de metamorfitas intruídas por granitos neopaleozoicos, a los que se sobreponen vulcanitas mesojurásicas y depósitos continentales asociados.

Trabajos de prospección aérea han puesto en evidencia gran cantidad de manifestaciones uraníferas, localizadas principalmente en las áreas marginales de la cuenca, dentro de las sedimentitas cretácicas.

Las características litológicas sumamente favorables de estos sedimentos continentales, donde participan, junto a secuencias clásticas fluviales, piroclásticas y vulcanitas ácidas (de presunta fertilidad), confieren al ambiente excelentes perspectivas desde el punto de vista uranífero.

Se ubican en este ámbito los Distritos uraníferos Los Adobes, Srra. Pichiñán, Srra. Cuadrada, etc., donde se emplazan yacimientos económicos del modelo epigénico, peneconcordante en conglomerados y areniscas cretácicas.

— *Ambiente regional XIV. Macizo Central de Santa Cruz (34 200 km<sup>2</sup>)*

Se sitúa en la porción centro-oriental de la provincia de Santa Cruz y sus límites coinciden en líneas generales con los del área positiva del Deseado. Sus características fisiográficas y climáticas y sus condiciones operativas son semejantes a las del Ambiente XIII.

Geológicamente está constituido por metamorfitas eopaleozoicas, sedimentos continentales eopérmicos y granitos neopaleozoicos que constituyen en su conjunto el "zócalo" de ese ambiente. En relación de discordancia angular siguen sedimentitas continentales triásicas y jurásicas que ocupan áreas reducidas y a las que subrayacen depósitos volcánicos de edad mesojurásica que afloran sobre grandes superficies.

La secuencia continúa con depósitos continentales correlacionables con el Grupo Chubut (Cretácico) que afloran en el borde norte del ambiente y con sedimentos continentales y marinos terciarios de poco desarrollo areal para culminar con basaltos terciarios y cuaternarios que ocupan considerables extensiones.

Las perspectivas uraníferas del Ambiente se consideran medianamente favorables, asociando parte de esa favorabilidad a la presencia de sedimentitas continentales cretácicas con presencia de algunos indicios, y a la existencia de secuencias piroclásticas ácidas con características potenciales de áreas de aporte fértiles en uranio.

— *Ambiente regional XV. Cordillera Patagónica Sur (44 950 km<sup>2</sup>)*

Se corresponde con la franja cordillerana austral y una expansión extra-andina que se ubican entre los 45° y los 50° 30' de latitud sur desde Lago Fontana hast Río Turbio sobre una longitud N-S de 700 km y un ancho de 100 a 300 km.

Las condiciones operativas tienen inconvenientes por lo inhóspito de la región y sus limitadas posibilidades de apoyo logístico, pese a lo cual la zona es genéricamente definible como factible en gran parte del año. Su columna litoestratigráfica en el sector cordillerano está integrada por metamorfitas y plutonitas eopaleozoicas, constituyendo el basamento sobre el que se disponen en discordancia vulcanitas mesojurásicas, y sedimentitas marinas del Cretácico Inferior. Continúan la secuencia depósitos continentales similares a los del Grupo Chubut, sedimentitas marinas del Cretácico Superior y depósitos intermontáneos terciarios. En la zona extracordillerana encontramos principalmente sedimentitas marinas y continentales terciarias y, culminando el cuadro, efusiones basálticas terciarias y cuaternarias.

Sus perspectivas de favorabilidad uranífera se basan en la existencia de intrusiones y vulcanitas ácidas que pueden integrar áreas de aporte fértil y en la presencia de sedimentitas continentales cretácicas y terciarias en la expansión extrandina, con regulares condiciones para la precipitación del ión uranilo en el modelo "uranio en areniscas".

El ambiente ha sido muy poco prospectado y solo se han ubicado indicios aislados en programas de reconocimiento muy locales (C° Principio: Río Pinturas, etc.).

### 2.3.1.2. Delimitación de “Unidades de prospección”

La definición original de estas entidades, según lo expuesto en 2.2.1., permitió la delimitación de 65 “Unidades de prospección” dentro de los 15 Ambientes regionales descritos anteriormente.

Sobre estas Unidades se centraliza el análisis, evaluación y evolución permanentes de los conocimientos de la Geología del Uranio I en Argentina, posibilitando con sus periódicas clasificaciones reordenar las prioridades en los programas nacionales de prospección.

En el Cuadro VII se detallan las Unidades definidas en cada “Ambiente regional” y se resumen los principales caracteres geológicos que han posibilitado su delimitación.

Sucesivos análisis y síntesis de ese Cuadro permiten establecer, hasta la fecha, las siguientes consideraciones:

#### **Ordenamiento de prioridades de las “Unidades de prospección”**

El análisis y evaluación de los parámetros de favorabilidad geológico—uranífera de las “Unidades” delimitadas (IFGU) según la metodología descrita permitieron lograr una clasificación de sus importancias y un ordenamiento de sus prioridades para la prospección (Fig.2), como sigue: 20 “Unidades de prospección” en 1ª prioridad con un total de 250 000 km<sup>2</sup>, 18 en 2ª prioridad y 250 000 km<sup>2</sup>, 15 en 3ª prioridad y 160 000 km<sup>2</sup>, y 12 en 4ª prioridad con un total de 190 000 km<sup>2</sup>; es decir, 65 Unidades y 750 000 km<sup>2</sup> en total.

Pese al carácter especulativo de esta clasificación, sirve ésta para reiterar la favorabilidad geológico—uranífera del país y para fundamentar la orientación y ordenamiento de los Planes nacionales de prospección.

#### **Estimación de los períodos geológicos y los probables modelos metalogénicos que participarían en las “Unidades” clasificadas**

En las “Unidades de prospección” clasificadas se ubica una amplísima gama de entidades litoestratigráficas con edades variables desde el Precámbrico al Cuaternario, abarcando algunos de los más importantes períodos metalogénicos del uranio conocidos en el mundo.

Se han delimitado tentativamente los períodos geológicos que participan en esas “Unidades” y se ha realizado una especulación sobre los probables modelos metalogénicos de uranio que se podrían ubicar en los mismos, de acuerdo con sus características litológicas y yacencias geológicas.

CUADRO VII. CUADRO DE PRIORIDADES DE LAS UNIDADES DE PROSPECCION

AMBIENTES		UNIDADES											
I	70.450 Km2. NORTE SUB-ANDINO	1	Qda.del Toro-Tilcara Sta. Victoria 16.200 Km2.	1a.	2	Sas.de Orán-Tartagal 8.000 Km2.	4a.	3	San Pedro 6.000 Km2.	4a.	4	Qda. de Humahuaca 5.500 Km2.	2a.
		Metamorfitas Precámbr.Sedi- ment.marinas Cambro-ordoví- cicas. Granitos paleozoicos Jirones sedimentarios costa- neras de Grupo Salta.			Sedimentos continentales // clásticos del Terciario Sub- andino y marginales paráli- cos del Grupo de Salta (Cre- tácico).			Predominio de sedimentitas continentales del Terciario Sub-andino con los sedimen- tos costaneros marinos del Grupo Salta.(Cretácico)			Sedimentitas del Grupo de / Salta y Terciario Sub-andi- no en facies similares a // las descritas en unidades anteriores.		
		5	Sa.del Gallo - Santa Bárbara 6.250 Km2.	3a.	6	Sa. Metán - Piquetq 8.500 Km2.	4a.	7	Sa.La Viña-Guachipas Carahuasi 14.300 Km2.	2a.	8	Sierra Medina Río Salí 5.700 Km2.	3a.
		Grupo de Salta y Terciario/ Sub-andino en ambos casos / con facies de sedimentitas/ similares a las descritas.			Predominio de sedimentitas/ continentales del Terciario Sub-andino con las series / costaneras marginales del / Grupo Salta.(Cretácico).			Predominio de sedimentitas del Grupo de Salta (Cretáci- co) con girones del Tercia- rio Sub-andino en facies / continentales clásticas.			Sedimentitas del Grupo de / Salta con restos de Tercia- rio Sub-andino		
II	60.590 Km2. PUNA	1	Santa Catalina Quichagua 9.340 Km2.	4a.	2	San Antonio de los Cobres Rangel 3.750 Km2.	2a.	3	Nevados Pastos Grandes Salar de Antofalla 47.500 Km2.	2a.			
		Sedimentitas marinas (grau- vacas, pelitas, etc.) Cambro ordovícicas. Efusivas ter- ciarias mesosilíceas a silí- ceas. Girones aislados Grupo Salta.(Cretácico).			Metamorfitas Precámbricas / esquistos, filitas, pizar- ras).Granitos Eopaleozoicos. Girones del Grupo Salta. // (Cretácico).			Metamorfitas Precámbricas / (filitas, esquistos cuarcí- ticos, etc.). Efusivas meso- silíceas y Granitos Tercia- rios. Coladas basálticas / Terciarias-Cuaternarias.					

REFERENCIAS :

	2	3	4
1	5		

- 1.- Número y denominación del Ambiente Regional y Superficie.
- 2.- Número de la unidad de prospección.
- 3.- Denominación de la unidad de prospección y superficie.
- 4.- Prioridad asignada según I.F.G.U. a la unidad de prospección.
- 5.- Síntesis de los principales rasgos geológicos de la unidad de prospección.

111 111.990 Km2. SIERRAS PAMPEANAS	1	Sas. Varela - Alto Penco-Las Quijadas 4.500 Km2.	2a.	2	Sas. San Luis Quines 10.750 Km2.	2a.	3	Comechingones El Morro 7.500 Km2.	3a.	4	Serrezuela Villa Dolores 5.500 Km2.	3a.
		Metamorfitas eopaleozoicas (filitas, gneises) en girones aislados y sedimentos / continentales clásticos del Permo-Carbónico y Triásico. (Paganzo 1,11,111).			Micacitas, gneises, filitas del Paleozoico inferior (?) intruídas por granitos eopaleozoicos. Girones de sedimentitas continentales clásicas de edad Triásica.			Metamorfitas eopaleozoicas/ (esquistos, gneises, filitas) y batolitos graníticos que la intruyen. (Devónicos)			Complejo metamórfico y granitos de anatexis eopaleozoicos (?) girones de sedimentitas continentales del Permo Carbónico (Paganzo 1-11) Vulcanitas Terciarias.	
	5	Sa. Chica 4.460 Km2.	4a.	6	Villa María-Tulumba-Ojo de Agua 7.120 Km2.-	3a.	7	Sa. de los Llanos Sa. Brava 6.900 Km2.	3a.	8	Sa. Velazco 7.000 Km2.	2a.
		Complejo metamórfico (gneises, biotíticos, esquistos, etc) con mármoles y filones pegmatíticos de edad Eopaleozoica-Girones de sedimentitas Cretácicas y terciarias.			Importantes batolitos graníticos del Eopaleozoico (500/550 m.a. por K-Ar) en facies normales y de tipo migmatítico. Sedimentos continentales clásticos Terciarios			Metamorfitas (Precámbricas? Paleozoico inferior?) filitas, micacitas, etc. Cuerpos/ de tonalitas facies normales y migmatíticas (Eopaleozoicas) Sedimentos Permo Carbónicos			Cuarcitas y migmatitas gneissicas (precámbricas?) Granitos normales y migmatíticos en / dimensiones batolíticas. Sedimentitas continentales. (Permo - Carbónicas y Triásicas)	
	9	Copacabana Capillitas 14.500 Km2.	1a.	10	Ambato - Ancasti 11.540 Km2.	3a.	11	Aconquija - Quilmes Cafayate - Cachi 21.720 Km2.	3a.	12	Sa. Guasayán 4.500 Km2.	4a.
		Metamorfitas de bajo y alto grado (precámbricas?) y cuerpos graníticos apotectónicos (Eopaleozoico-Devónico) Sedimentitas continentales Pérmicas y Terciarias.			Complejo metamórfico predominante facies migmatíticas (gneises, micacitas, etc.) de edad Precámbrica (?) a Eopaleozoica. Cuerpos granitos menores de edad eopaleozoica.			Metamorfitas (esquistos en el norte a pizarras y filitas en el sur) de edad Precámbrica (?) a Eopaleozoica. Granitos sintectónicos y / apotectónicos (devónicos).			Metamorfitas (gneises, micacitas, filitas, etc) de edad Eopaleozoica (?). Granitos de anatexis y cuerpos batolíticos apotectónicos (devónicos) ?).	
	13	Valle Fértil 6.000 Km2.	3a.									
		Complejo metamórfico Paleozoico inferior (Precámbrico?). Granitos sintectónicos y apotectónicos eopaleozoicos Sedimentos continentales / (Permo - Carbónicos).										



VIII	35.000 Km2. LA PAMPA	1	Sierra Pintada La Escondida 6.000 Km2.	1a.	2	Lihuel-Calei- Pichi-Mahuída 12.000 Km2.	2a.	3	Algarrobo del Aguila 17.000 Km2.	3a.							
		Basamento metamorfitas devó- nicas. Sedimentos marinos y depósitos molásicos Carbóni- cos Sedimentos clásticos Per- micos. Vulcanitas ácidas Per- mo T y Sedim.Terc.continent.				Metamorfitas y sedimentos / marinos eopaleozoicos.Vulca- nitas neopaleozoicas y triá- sicas de tipo ácido y meso- silíceo.,				Sedimentos y metamorfitas / Paleozoico inferior. Hipabi- sales, y vulcanitas ácidas- Permo-Triásico. Sedimentos/ continentales clásticos ter- ciarios.							
IX	87.220 Km2. GEOSINCLINAL ANDINO	1	Cordón La Ramada- Río Diamante 6.800 Km2.	4a.	2	Río Diamante Río Barranca 10.500 Km2.	4a.	3	Diamante - Malargue Chachahuen 9.500 Km2.	1a.	4	Chos-Malal Las Lajas 10.400 Km2.	1a.				
		Sedimentitas marinas y costa- neras a batiales del Jurási- co y Cretácico inferior. // Plutonitas Cretácicas y Ter- ciarias y en amplias super- ficies vulc. mesoc.Terciarias				Sedimentos marinos Jurásico Cretácico inf.Molasas conti- nentes-Cretácico medio Sup (red-beds).Vulcanitas meso- líceas y sedim.continen.Ter- ciarios-Basaltos Cuaternar.				Basamento plutónico Pérmico Sedimentos continentales - Triásicos. Sedimentitas mari- nas Jurásicas Cretácicas. / Cretácico medio molásico con- tinental.Vulc.y sedim.Terc.				Sedimentos marinos margina- les Jurásicos y predominio / de "red-bed"del Cretácico me- dio Superior. Plutonita eopa- leozoica en asomo aislado.			
		5	El Cuy - Barranca 21.460 Km2.	1a.	6	Franja Oriental Neuquén 28.560 Km2.	2a.	7	Las Coloradas 6.100 Km2.								
		Sedimentos marinos Jurási- cos con períodos continenta- les clásticos. Cretácico me- dio superior con sedimentos continentales clásticos.				Sedimentos continentales / clásticos(red-beds)del Cre- tácico medio y superior. De- pósitos marinos Cretácico 7 superior. Sedimentos clásti- cos Terciarios.				Sedimentitas marinas Jurá- sico - Cretácico. Secuen- cia "red-beds" Cretácico // Medio.Sedimentitas continen- tales clásticas Terciarias.							
X	16.500 Km2. CORDILLERA PATA- GONICA NORTE	1	Cordón del Viento 5.200 Km2.	3a.	2	Laguna Pajarito 3.700 Km2.	3a.	3	Loncopuá- 7.600 Km2.	3a.							
		Piroclastitas ácidas,sedi- mentitas marinas y plutoni- tas carbónicas-secuencia pi- roclásticas y sedimentarias Triásicas.Andesitas y Basal- tos Terciarios cuaternarios				Vulcanitas terciarias meso- silíceas-Terciario continen- tal clástico Intermontano. Basaltos terciarios Cuater- narios.				Efusivas terciarias mesosi- líceas. Basaltos cuaterna- rios.							

XI	63.000 Km2. CORDILLERA PATAGONICA CENTRAL	1	Lago Norquínco Pilcaniyeu 36.000 Km2.	2a.	2	Gastre 12.000 Km2.	1a.	3	Tecka 15.000 Km2.	4a.		
		Metamorfitas precámbricas / (?)eopaleozoicas-plutonitas ácidas (granitos,tonalitas) neopaleozoicas. Sedimentos continentales, vulcanitas- mesosilíceas y basal.Terc.			Plutonitas ácidas paleozoi- cas.Sedimentos continentales clásticos y piroclásticos ácidos Cretácicos. Vul- canitas mesosilíceas y ba- saltos neógenos.			Metamorfitas eopaleozoicas granitos Paleozoicos y sedí- mentos clásticos continenta- les Jurásicos y Cretácicos.				
XII	55.050 Km2. DORSAL NORTE PATAGONIA	1	Jacobaci - Valcheta 23.300 Km2.	3a.	2	Sierra Grande 19.750 Km2.	1a.	3	Pire-Mahuída Sacanana 12.000 Km2.	2a.		
		Metamorfitas y plutonitas / precámbricas(?)Sedimentitas eopaleozoicas -Plutonitas / carbónicas-pérmicas.Vulcani- tas Jurásicas mesosilíceas. Sedim.cont.Cret.y Terciarios			Plutonitas,metamorfitas y se- dimentos Paleozoicos. Vulca- nitas Triásico-Jurásicas, se- dimentitas continentales // Cretácicas y marinas terciarias.			Vulcanitas ácidas terciarias Basaltos terciarios y cuaternarios. Relictos de sedimen- titas cretácicas y terciarias.				
XIII	72.420 Km2. MACIZO CENTRAL DEL CHUBUT	1	Paso de Indios Telsen 26.420 Km2.	1a.	2	Las Plumas Camarones N. 20.500 Km2.	1a.	3	Sarmiento Camarones S. 18.750 Km2.	2a.	4	Laguna Sirven 6 750. Km2. 1a.
		Vulcanitas mesosilíceas y / sedimentitas contin.jurási- cas.Predominio de sedimen- tos clásticos y tuffíticos / ácidos del Cretácico.Sedim. marin.terc.Basaltos neógen.			Basamento volcánico-sedimen- tario continental-jurásico. Sedimentos continentales Cretácicos y marinos terciarios. Vulcanitas ácidas y basaltos terciarios.			Vulcanitas y sedimentitas ju- rásicas. Sedimentos continen- tales Cretácicos y marinos terciarios. Basaltos neóge- nos.			"Serie porfirítica" jurásica (vulcanitas mesosilíceas,se- dimentitas cont.etc).Depósi- tos continentales clásticos y piroclásticos cretácicos. Basaltos neógenos.	
XIV	34.200 Km2. MACIZO CENTRAL- DE SANTA CRUZ	1	La Manchuría 24.200 Km2.	1a.	2	Bahía Laura 10.000 Km2.	2a.					
		Porfirinitas jurásicas.Giro- nes aislados de sedimenti- tas continentales Cretáci- cas. Basaltos Terciarios- Cuaternarios.			Basamento porfirico jurási- co con afloramientos disper- sos de sedimentitas conti- nentes Cretácicas y marinas terciarias.							

XV	44.950 Km2. CORDILLERA PATAGONICA SUR	1	Lago - Fontana - Lago Buenos Aires 13.250 Km2.	2a.	2	Río Pinturas - Lago Belgrano 11.750 Km2.	1a.	3	Lago Argentino- C°Principio 11.750 Km2.	3a.	4	Río Santa Cruz 4.700 Km2.	4a.
		Metamorfitas devónicas.Sedi- mentos continentales Triási- cos-Piroclastitas y sedimen- titas jurásicas.Depósitos cont.Cretácicos. Plutonitas vulc.y sedim.cont.Terciár.			Serie volcánica sedimenta- ria jurásica sobre basamento pre-antracólitico(metamorfi- tas y vulcanitas)Depósitos/ marinos Cretácico inf.y sedi- men.cont.Cretác.-Terciarios.			Metamorfitas devónicas(pi- zarras,etc)y plutonitas. Se- dimentos marinos Cretácicos Efusivas e Intrusivas meso- cont. clásticos Terciarios.			Sedimentitas continentales clásticas del Terciario infe- rior y superior. Depósitos marinos del eógeno.Basaltos/ silíceas Terciarias.Sedim. cuaternarios.		
		5	Río Turbio 3.500 Km2.	3a.									
		Sedimentos continentales // clásticos terciarios (Paleo- ceno al Mioceno).Depósitos fluvio-glaciales cuaterna- rios.											

## RESUMEN

1a. PRIORIDAD		2a. PRIORIDAD		3a. PRIORIDAD		4a. PRIORIDAD		TOTALES	
Cantidad de Unidades	Km2.	Cantidad de Unidades	Km2.	Cantidad de Unidades	Km2.	Cantidad de Unidades	Km2.	Cantidad de Unidades	Km2.
20	250.000	18	250.000	15	160.000	12	90.000	65	750.000

Resulta así probable estimar para las unidades litoestratigráficas ígneas y metamórficas que cubren el intervalo entre el Precámbrico y el Paleozoico Medio, la posible presencia predominante de modelos con hábitos “filonianos” y de “dispersión”. La existencia de indicios y yacimientos con esas yacencias en el país convalidan estas especulaciones (agrupamiento Santa Victoria en Ambiente I, Sañogasta en Ambiente IV, Dto. “Los Gigantes” en Ambiente III, etc.).

En el intervalo Carbónico-Pérmico-Triásico, las características litoestratigráficas de sus secuencias acuerdan perspectivas de ubicar los modelos de “uranio en areniscas” en las sedimentitas continentales clásticas que ocupan diversas cubetas intracratónicas en ese lapso geológico, y los modelos de hábito “filoniano” y “dispersión” en las series ígneas (especialmente volcánicas ácidas) de igual edad. Ambos modos de yacencia en unidades líticas de esta edad se han ubicado en Argentina. (Guandacol – Hachal en Ambiente VI, Sierra Pintada en Ambiente VIII para los modelos peneconcordantes y en Cacheuta y Carrizal en Ambiente VI, etc., para hábitos vetiformes).

Durante el Mesozoico Medio Superior y preferentemente en el Cretácico Medio, las perspectivas de ubicar yacimientos de uranio se circunscriben a los modelos peneconcordantes, lenticulares, etc. en sedimentos en tres grandes cubetas cretácicas:

- Cuenca andina norte — Ambiente regional I
- Cuenca del geosinclinal andino — Ambiente regional IX
- Cuenca del Chubut — Santa Cruz — Ambiente regional XIII

La Cuenca andina proporciona un modelo de uranio peneconcordante en sedimentitas marinas de plataforma, que no son muy comunes en el mundo. En las otras dos cuencas el “modelo” predominante correspondería al tipo clásico “uranio en areniscas”, del que se han ubicado numerosos indicios y yacimientos (Distrito Malargue, etc., Ambiente regional IX y Distrito Pichiñán, Ambiente XIII).

Finalmente el Terciario marca un período metalogénico que posee perspectivas de contener los modelos de “uranio en areniscas” y “supérgenos” en las sedimentitas continentales clásticas y químicas; y los modelos “filonianos” e “intramagmáticos” en las series volcánicas del magmatismo andino. Diversas anomalías y yacimientos de uranio se han ubicado en el país bajo esos modelos en unidades líticas sedimentarias e ígneas de edad terciaria (Distrito Cosquín — Ambiente III “peneconcordante” y Distrito Papagayos en Ambiente VI con “hábito filoniano”).

Cabe quizás una consideración final para algunos sedimentos de edad cuaternaria que suelen aflorar en algunos Ambientes del país y donde cabría la perspectiva de ubicar yacimientos de uranio del tipo “calcrete”. Es probable que recientes descubrimientos de uranio en “caliches” del Ambiente regional XIII pudiesen pertenecer a estos modelos.

### *2.3.2. Evolución de la prospección y exploración de recursos uraníferos argentinos*

En 1950, con la creación de la Dirección Nacional de Energía Atómica y la colaboración de la Universidad Nacional de Cuyo se inician algunos programas locales de *prospección terrestre y la revisión de algunos indicios conocidos*. Desde 1956, las tareas inherentes a las materias primas nucleares se concentran en la Comisión Nacional de Energía Atómica, organismo que se ocupó, hasta 1960, de integrar sus cuadros técnicos, de organizar y equipar sus laboratorios y comisiones geológicas y, en especial, de capacitar a su personal.

En 1961 se inician planes sistemáticos de prospección-exploración y se evoluciona en la aplicación de métodos y técnicas para optimizar sus alcances, logrando los primeros resultados sobre las condiciones de distribución y yacencia geológica del uranio en el territorio nacional.

El año 1969 marca un hito fundamental en esa evolución, pues se inician los primeros estudios geológico—uraníferos integrados a nivel nacional, lo que permite delimitar los Ambientes y Unidades con favorabilidad geológico—uranífera, procediendo a su clasificación, ordenamiento de prioridades y estimación de su potencial uranífero, a fin de orientar los lineamientos técnico-políticos más adecuados para su desarrollo.

Pese a contar con sólidos fundamentos técnicos surgidos de esos estudios, limitaciones presupuestarias redujeron los alcances de los correspondientes programas de prospección-exploración del país. De ahí viene que hasta la fecha solo se cuente con un conocimiento parcial y de un número reducido de las Unidades de prospección clasificadas como de elevada favorabilidad geológico—uranífera. El resto de esas Unidades todavía no han sido reconocidas o bien cuentan solo con etapas de reconocimiento muy preliminares y locales, cuyos resultados inconclusos suelen dejar abiertas, totalmente, las favorabilidades de sus expectativas uraníferas.

A pesar de esas limitaciones se logró el descubrimiento de centenares de anomalías radiométricas e indicios de uranio que, convenientemente clasificados y ordenados, permitieron iniciar la confección de un Registro Nacional de *Indicios* e incrementar los conocimientos sobre la distribución y condiciones de yacencia geológica del uranio en el país.

Esos ordenamientos facilitaron la selección de 306 anomalías de interés y su clasificación según diferentes niveles de importancia y prioridad con fines a su exploración.

El Cuadro VIII detalla la distribución de esos indicios según la edad de las rocas portadoras, el modelo metalogénico genérico adjudicado a sus yacencias y la ubicación en los “Ambientes regionales”.

A su vez, la consideración de esas anomalías en el cuadro geológico donde yacen permitió en algunos casos reunir las en Agrupamientos o Distritos (Fig.5) que constituyen el “ámbito areal de mayor favorabilidad” a los efectos de

CUADRO VIII. DISTRIBUCION DE LOS INDICIOS URANIFEROS

Edad geológica roca portadora	N° de depósitos con hábitos peneconcordantes lenticulares etc., en sedimentos	Idem con hábitos “filonianos”, “intramag- máticos”, etc.	Total N° indicios	Ambientes Reg. donde se ubican
Terciario Inf/Sup	9	10	19	I, II, III, IV, VI
Cretácico	127	3	130	I, IX, XIII, XIV
Jurásico	5	2	7	IX, XI, XIV
Triásico	2	18	20	III, IV, VI, VIII
Pérmico	14	11	25	IV, VI, VIII
Carbónico	44	9	52	III, IV, VI, VIII
Paleozoico Inf/Med	—	48	48	I, III, IV, V, VI
Precámbrico?	—	4	4	III
Totales	201	105	306	

planificar en él los programas de exploración para reconocer la continuidad y eventual repetición de los cuerpos conocidos en profundidad, etc. La diferencia entre ambos estriba en el hecho de que los Distritos constituyen entidades con yacimientos económicos explotados o con programas de producción en ejecución.

Se logró así discriminar 40 “Agrupamientos de indicios” y 14 “Distritos uraníferos” que se detallan en el Cuadro IX, con discriminación de los hábitos de yacencia y edad geológica de los yacimientos e indicios dentro de sus límites.

Las limitaciones presupuestarias afectaron también los programas de exploración de esos “Agrupamientos” y “Distritos” reduciendo las posibilidades de desarrollar los recursos potenciales de uranio que se estima existen en los mismos. Un ejemplo de ello es el reducido metraje de perforaciones ejecutadas en esos programas desde 1952 a 1978: 230 000 m de sondeos totales para el país, y las “reservas” cubicadas hasta esa fecha: RRA 27 000 t de  $U_3O_8$ , lo que da una relación inmejorable de 8 m de sondeos por t de  $U_3O_8$  cubicada y abre un amplio campo de expectativas para el desarrollo de sus RAE.



FIG. 5. Ubicación de Agrupamientos y Distritos uraníferos.



### 3. ESTIMACION DE LOS RECURSOS URANIFEROS DE LA ARGENTINA

Para la evaluación de los recursos de uranio en Argentina se han utilizado algunas definiciones sugeridas por el OIEA y métodos y principios de explotación propios de la CNEA.

Se integran así una serie de cuadros que evalúan, por un lado, las “Reservas” de uranio sobre las que se planifican los programas nacionales de instalaciones de reactores, etc. y, por el otro, sus recursos especulativos, que establecen las perspectivas geológicas potenciales del país, a los fines de considerar los lineamientos técnico-políticos más adecuados para su desarrollo.

#### 3.1. Estimación de las “Reservas”

Para la estimación de las reservas se utilizan las técnicas convencionales de evaluación, complementadas en algunos casos con la aplicación de algunos métodos estadísticos y geoestadísticos, y se siguen los principios de clasificación según ordenamientos en niveles de certidumbre y economicidad sugeridos por el OIEA (Cuadro X).

Para la distribución de los valores del Cuadro X, según Ambientes regionales y Distritos uraníferos del país, sírvanse consultar el Cuadro XI.

Si sintetizamos las cifras en los cuadros metalogénicos y cronoestratigráficos del uranio en el país, observamos que los mismos se distribuyen según detalle:

- Por edad geológica de la roca portadora
  - 7 000 t de  $U_3O_8$  en el Terciario
  - 9 000 t de  $U_3O_8$  en el Cretácico
  - 30 000 t de  $U_3O_8$  en el Permo – Carbónico
  - 5 000 t de  $U_3O_8$  en el Paleozoico Inf-Medio
- Según modelo metalogénico generalizado de sus yacencias
  - 44 500 t de  $U_3O_8$  en yacimientos de hábitos sedimentarios peneconcordantes, lenticulares, etc. genéricamente definibles como “Uranio en areniscas”
  - 6500 t de  $U_3O_8$  en yacimientos de hábitos “filonianos”, “dispersión” etc.

#### 3.2. Estimación de los “Recursos especulativos”

Para esta estimación se elaboró un método evaluativo que, dentro del esquema de extrapolaciones y especulaciones teóricas que implica su aplicación, intenta alcanzar el máximo grado de objetividad en sus resultados.

CUADRO X. ESTIMACION DE LAS RESERVAS SEGUN NIVELES DE CERTIDUMBRE Y CATEGORIAS ECONOMICAS

Categorías de Certidumbre	Categorías Económicas	<30 dólares/lb de $U_3O_8$ (t de $U_3O_8$ )	30–50 dólares/lb de $U_3O_8$ (t de $U_3O_8$ )	>50 dólares/lb de $U_3O_8$ (t de $U_3O_8$ )	Totales (t de $U_3O_8$ )
RRA <sup>a</sup>		27 000	6 000	3 000	36 000
RAE <sup>b</sup>		4 500	6 000	4 500	15 000
Totales		31 500	12 000	7 500	51 000

<sup>a</sup> Recursos razonablemente asegurados.

<sup>b</sup> Recursos adicionales estimados.

CUADRO XI. DISTRIBUCION VALORES SEGUN AMBIENTES REGIONALES Y DISTRITOS URANIFEROS

AMBIENTE REGIONAL	DISTRITO	RRA <sup>a</sup> (t de U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )			RAE <sup>b</sup> (t de U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )			Totales (t de U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )
		<30 dól. lb/U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	30-50 dól. lb/U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	50 dól. lb/U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	<30 dól. lb/U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	30-50 dól. lb/U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	50 dól. lb/U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	
I	"Tonco Amblayo"	1 500	500	---	---	150	---	2 150
I	"Pampa Grande"	800	850	---	---	---	---	1 650
III	"Los Gigantes"	1 400	500	500	500	500	1 000	4 400
III	"Comechingones"	100	200	200	---	250	---	750
III	"Los Colorados"	100	100	100	---	---	---	300
III	"Cosquín"	3 300	400	---	1 000	1 000	1 000	6 700
IV	"Tinogasta"	100	350	---	---	200	---	650
VI	"Guandacol"	---	450	---	---	200	---	650
VIII	"Sierra Pintada"	19 000	1 500	2 000	2 000	2 500	2 000	29 000
XIII	"Sierra Pichiñán"	500	200	---	500	500	---	1 700
XIII	"Sierra Cuadrada"	100	100	---	---	200	---	400
IV-VI	De varios distritos menores	100	850	200	500	500	500	2 650
	TOTALES	27 000	6 000	3 000	4 500	6 000	4 500	51 000

<sup>a</sup> Recursos razonablemente asegurados.<sup>b</sup> Recursos adicionales estimados.

CUADRO XII. ESTIMACION DE LOS RECURSOS ESPECULATIVOS SEGUN NIVELES DE FAVORABILIDAD

AMBIENTES REGIONALES EVALUADOS	RECURSOS ESPECULATIVOS							
	Alt. favorabilidad IFGU entre 6 a 10		Med. favorabilidad IFGU entre 4 a 6		Baj. favorabilidad IFGU menor de 4		Totales	
	Sup. en km <sup>2</sup>	t de U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Sup. en km <sup>2</sup>	t de U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Sup. en km <sub>2</sub>	t de U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	km <sup>2</sup>	t de U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Del I al XV	250 000	240 000	240 000	85 000	250 000	55 000	740 000	380 000

El método se fundamenta en la aplicación para cada “unidad geológica” a evaluar, de una fórmula donde se han integrado los siguientes parámetros básicos:

- *Índice de favorabilidad geológico—uranífera (IFGU)*, estimado según se describe en 2.2.2.
- *Módulo de “densidad de la mineralización” (D)*, calculado de la relación: Tonelaje  $U_3O_8\%$ . Superficie promedio de los depósitos conocidos en la unidad a evaluar. Si no existen depósitos conocidos, se utilizan 2 “módulos tipo”, uno para “ambientes sedimentarios” (sedimentitas clásticas continentales, o marginales con perspectivas de modelos de tipo “uranio en areniscas”) y otro para los “zócalos” (intrusivos, efusivos, metamorfitas, etc. con probabilidades de modelos de hábito “filoniano”, “dispersión”, etc.). Los valores de esos “módulos tipo” se calculan según parámetros promedios de espesor, leyes y superficies con que suelen presentarse esos modelos metalogénicos en nuestro país. En el primer caso, el módulo se estima para una “reserva promedio” de 100 t de  $U_3O_8$  sobre una superficie de 0,04 km<sup>2</sup> (h espesor = 1 m; x ley = 1‰  $U_3O_8$ ); en el segundo caso los valores descienden a 50 t de  $U_3O_8$  para esa misma superficie (h = 0,5, y x = 1‰  $U_3O_8$ ).
- *“Factor de corrección” (K)*. Corresponde al factor de repetición de la densidad de la mineralización”. Se estimaron 2 factores para “ambientes sedimentarios” y “zócalos” utilizando las relaciones de regiones de esas características conocidas en el mundo (Wyoming Colorado en E.E.U.U., Arlit en Níger para los “sedimentos”, y Granitos Hercínicos de Francia, etc. para los “zócalos”).
- *“Área” (A)* de la “unidad geológica” a evaluar. Esta superficie se estimará extrapolando desde los afloramientos de la unidad hasta una profundidad de eventual explotabilidad económica.  
Estos parámetros se integran en la fórmula según detalle:  
$$\text{Recursos especulativos} = (\text{IFGU}) \cdot A \cdot D \cdot K.$$

Los resultados de cada unidad geológica evaluada fueron discriminados en 3 niveles de confiabilidad acorde a sus IFGU, a fin de clasificar estos recursos según las siguientes escalas:

- REAF: Recursos especulativos de alta favorabilidad con un IFGU entre 10 y 6
- REMF: Recursos especulativos de mediana favorabilidad con un IFGU entre 6 y 4
- REBF: Recursos especulativos de baja favorabilidad con un IFGU menor de 4.

Las “unidades geológicas” evaluadas se integraron a nivel de los Ambientes regionales delimitados en el país, cuyos valores preliminares se reflejan en el Cuadro XII (estimación de 1976).

Las bases especulativas de esta estimación hacen suponer que se deberán producir lógicas variables en esas cifras a medida que se avance en la prospección—exploración del país, que se incremente a nivel nacional el conocimiento de la distribución y yacencia del uranio y que se amplíen a nivel mundial los antecedentes sobre la Geología del uranio y sus modelos metalogénicos.

## DISCUSSION

P.D. TOENS: Is it not dangerous to compound speculative resources with reserves and does this not go against the recommendations of the IAEA and INFCE?

A.E. BELLUCO: It is possible that I did not express myself clearly on this point when I gave my paper. I should therefore explain that the two estimates are independent and that they both basically satisfy the relevant requirements of the IAEA.

F. RODRIGO: I would just like to add a word of explanation here. The table is perhaps not sufficiently clear but I believe the information complies strictly with the IAEA requirements. The first row (RRA) shows the reasonably assured resources. The first figure of 27 000 t  $U_3O_8$  corresponds to the estimate for costs of up to US \$80/kg U; the subsequent figures refer to the other cost categories. The second row (RAE) shows the estimated additional resources. The speculative resources correspond to the new category introduced by the Agency and we believe that we have supplied the relevant information here.

M. MARTIN: I would be interested to know the density of the reference points, expressed as the number per linear or square kilometre, so as to get a quantitative idea of the geological favourability indices for uranium in the various geological units mentioned.

A.E. BELLUCO: To estimate the geological-uraniferous favourability, we have used in each prospecting unit for Argentina all the data provided by the results of the different general prospecting techniques so far used (airborne, geochemical, etc.) plus all the speculative geological uraniferous parameters resulting from a knowledge of the regional geology and from the numerous trips made in the different areas. However, it is impossible to give a density for this sample of the geological uraniferous parameters; what we can confirm is that the values differ very much, depending on whether general prospecting has been carried out in the zones or not.

P.M. BARRETTO: What is the position of the Cretaceous and Tertiary formations with regard to uranium favourability in the direction towards Bolivia and Chile?

A.E. BELLUCO: The uranium-bearing geological formations of the Cretaceous in Argentina correspond to geological units with distinct environments and deposition conditions, and it is therefore necessary to treat them separately when considering the possibility of extrapolating this favourability into neighbouring countries. The Yacoraite Formation (Cretaceous) in northern Argentina is made up of uranium-bearing sandstones and carbonaceous pelites and constitutes part of the fill of a marine basin which stretched from Bolivia to a latitude of  $27^{\circ}$  south. On the western edge of this basin there is a belt with uranium anomalies (where deposits are already being worked in the El Tonco district) approximately 200 km long and 20–50 km wide; these anomalies were fed from a fertile area with Eopalaeozoic granites (Cachi zone). The southern and eastern boundaries of the basin are sterile and have a quite different source area. It may be possible to extrapolate the western edge of the basin into Bolivia, but studies would have to be made to see whether the same fertile source conditions are maintained.

The Upper Cretaceous of the Mesozoic basin of the Cuyo region (Mendoza and Neuquén provinces) in the west central part of Argentina is made up to the Diamante Formation (1000 m thick), which is of continental origin and marks the regression of the Jurassic Lower Cretaceous sea. This gave rise to a cycle of red-bed-type continental molasse deposits with sandstones and grey conglomerates yellowed by discoloration with epigenetic bitumen in the cement matrix and interspersed red pelite levels. These lie in relatively smooth structure with dips of up to  $30^{\circ}$ . The source area for these sediments on the eastern edge is presumably the lithological sequences of an acidic Permo-Triassic magmatism which are considered to be uranium-fertile in Argentina; this condition and the clastic nature of the material close to the sources have given rise to numerous anomalies and uraniferous districts (Malargue, etc.) with economic deposits in the Diamante Formation. We have observed that this lithological condition changes progressively as we go towards the west (in the direction of the Chilean border), where the sediments become finer. The clastic fractions show no discoloration because reducing conditions are absent (there are probably no bitumens), and they finally appear in a tectonic deformation stage exhibiting strong folds which reduce the geological uraniferous favourability.

The Cretaceous in the San Jorge Gulf basin in central Patagonia (southern Argentina) also corresponds to red-bed-type continental deposits with organic material in the form of carbonaceous logs and leaves with which are associated uranium minerals. This is a basin which contains numerous anomalies and districts with economically workable deposits. It is limited to the territory of Argentina and there seems no possibility at the moment of extrapolation to Chile. The Tertiary of the sub-Andean Sierras in northern Argentina is made up of a powerful sequence of sandstones and continental fluvial and lacustrine

pelites with the remains of carbonaceous plant material; this is associated with uranium in indices and anomalies that have not yet yielded economic deposits, although I should say that the area has been little explored. These formations extend into Bolivia in the same morphostructural unit (sub-Andean Sierra), and I believe that their lithology and favourability are similar to those in Argentina.

H.J. GOSO: There are two large evolutionary zones in the geology of South America — an Atlantic zone, a Pacific zone, if we may so describe them. Could you say something about the general favourability characteristics associated with the Atlantic zone in Argentina, especially in the central and northern parts of the country?

A.E. BELLUCO: I am afraid I cannot answer this question because the regions included in this area of Argentina have not been evaluated for geological uraniferous favourability.

# ANTECEDENTES DE LA PROSPECCION Y ANALISIS DE LA FAVORABILIDAD GEOLOGICO-URANIFERA DEL PERU

J. SOSA, G. ARROYO

División de Materias Primas,  
Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN),  
Lima, Perú

A.E. BELLUCO

Experto del OIEA,  
Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA),  
Cruz, Mendoza, Argentina

## Abstract-Resumen

### INFORMATION ON PROSPECTING AND ANALYSIS OF THE GEOLOGICAL URANIFEROUS FAVOURABILITY OF PERU.

The activities carried out in Peru from 1958 until 1975 in search of uranium deposits are described. In 1976 the 'Peruvian Nuclear Plan' was approved, and the Peruvian Institute of Nuclear Energy/Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) was given the responsibility of organizing and carrying out all activities related to uranium exploration and production in the country. The programme is under implementation and comprises organization of infrastructural support, training of technical personnel, selection of favourable areas, and exploration and adoption of the most favourable national policy to permit development of the national uranium resources. The criteria applied for definition of the 'uranium favourability' of the main Peruvian geological environments are described, taking into account geological composition and concepts relating to the metallogenesis and control of uranium deposits. The results of this area selection are reported.

### ANTECEDENTES DE LA PROSPECCION Y ANALISIS DE LA FAVORABILIDAD GEOLOGICO-URANIFERA DEL PERU.

Se describen las actividades de búsqueda de yacimientos de uranio desarrolladas en el Perú entre 1958 y 1975. En 1976 fue aprobado el "Plan Nuclear del Perú" y se confió al Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) la responsabilidad de organizar y realizar todas las actividades relacionadas con la exploración y producción de uranio en el país. El programa se está ejecutando y comprende la organización de servicios de infraestructura, la capacitación de personal técnico, la selección de zonas favorables, y el estudio y adopción de la política nacional más propicia para la explotación de los recursos nacionales de uranio. Se describen los criterios aplicados para la definición de la "favorabilidad uranífera" de los principales ambientes geológicos peruanos, teniendo en cuenta la composición geológica y los conceptos relativos a metalogénesis y factores que influyen en los yacimientos de uranio. Se indican los resultados de esta selección de zonas.

## 1. INTRODUCCION

La República del Perú ha confiado al Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) la tarea de organizar y realizar todas las actividades relacionadas con la exploración y producción de uranio en el país. Para ello, este organismo está llevando a cabo el análisis preliminar de la favorabilidad geológica, capacitando a su personal técnico y estableciendo el encuadre técnico-político que permita descubrir y evaluar los posibles recursos uraníferos del Perú, con el apoyo eventual de terceros y en el marco del máximo interés y salvaguardia nacional.

## 2. ANTECEDENTES

La prospección de uranio en el Perú se inició en 1968 a través de la Junta de Control de Energía Atómica (JCEA, actualmente IPEN). Las condiciones operativas restringidas y los recursos económicos insuficientes con que la institución debió actuar durante un prolongado período de sus actividades, limitaron sus acciones y los objetivos de su División Materias Primas de reconocer la favorabilidad uranífera del país.

En una primera etapa (1958-63) y con el apoyo de la USAEC, estas actividades se orientaron al reconocimiento radiométrico de los principales yacimientos polimetálicos conocidos hasta esa fecha en la Cordillera de la Costa y Cordillera Occidental. Pese a que los estudios no fueron completos en cuanto al grado de cobertura de las zonas reconocidas, se ubicaron diversas anomalías de uranio, asociado éste a otros metales en poca cuantía. Algunas tareas menores de exploración definieron el carácter no comercial de esos descubrimientos, cuyos detalles de yacencia geológica se sintetizan a continuación:

- Manifestaciones uranotoríferas, asociadas a pegmatitas en rocas ácidas de edad paleozoica a precámbrica: Pampacolca, San Francisco, Quilca, etc.;
- Uranio asociado a metalización paleozoica (tardihercínica?), en relación con mineralización de níquel, cobalto, cobre, etc., de hábito filoniano: Vilcabamba (Prov. Andina Oriental);
- Manifestaciones de uranio asociadas a la metalogenia neocretácica-terciaria del Perú (Fig. 1) y relacionadas con mineralización de cobre (molibdeno), hábito filoniano: minas Eliana-Raquel, etc. (subprovincia cuprífera de la vertiente del Pacífico), así como con la mineralización de cobre, plomo, zinc, plata, mercurio, etc., hábito filoniano, mantos, tubos de brecha, etc.: Sayapullo, Colquijirca, Restauradora, etc. (subprovincia polimetálica del altiplano).

Otras manifestaciones de esta época mostraban su uranio asociado a fosfatos en sedimentos terciarios (Bayovar), a travertinos, etc.

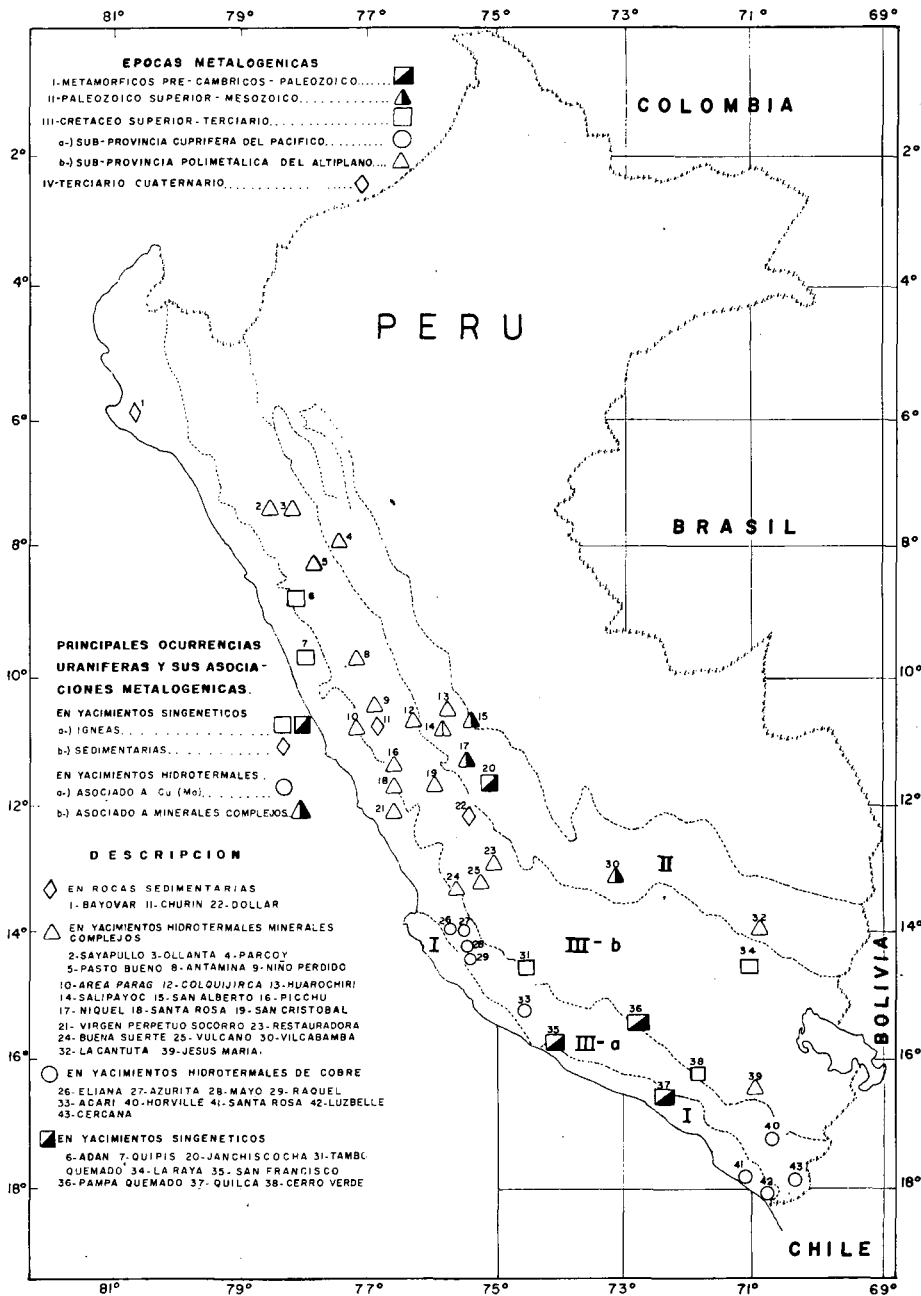


FIG.1. Manifestaciones de uranio asociadas a la metalogenia del Perú.

Como tareas complementarias en ese período se ejecutaron algunos itinerarios de reconocimiento geológico-radiométrico y revisiones locales de algunas secuencias litroestratigráficas continentales, clásticas, cretácicas y terciarias que reunían condiciones de aparente favorabilidad uranífera en el centro y sur del país.

Algunas conclusiones radiométricas areales de esa época indujeron a considerar que el gradiente de la mineralización decrecía hacia el este y, paralelamente, la favorabilidad uranífera para los yacimientos en modelos de hábito filoniano se incrementaba en esa misma dirección.

En el período 1963–70, las tareas se restringieron sensiblemente y, desde 1971 al 75, se fueron reactivando en forma paulatina, aunque siempre con recursos muy distantes de los necesarios para el logro de una resultante eficiente.

En 1976, el IPEN inició la primera etapa (1976–81) del “Plan Nuclear del Perú”, que preveía para el sector responsable del desarrollo de sus recursos uraníferos:

- Organizar una infraestructura técnica y la correspondiente capacitación de su personal en el campo de la prospección, exploración, desarrollo y tratamiento de menas de uranio
- Elaborar un cuadro preliminar de favorabilidad geológico-uranífera del país a fin de establecer el dimensionamiento técnico-financiero tentativo de su investigación.
- Aplicar el Programa Nacional de Prospección uranífera con una concepción metodológica y una dimensión de explotación acorde a los resultados del punto anterior.
- Analizar el lineamiento técnico-político más adecuado según esos antecedentes, para conformar el conocimiento y eventual explotación de los recursos de uranio del país.

El Plan Nuclear mereció por su importancia la aprobación de las autoridades nacionales y la colaboración del PNUD-OIEA a través de un Convenio de Asistencia Técnica de 3 a 5 años de duración, iniciado en 1977.

### 3. OBJETIVOS ALCANZADOS

Hasta la fecha se han logrado sustanciales avances en las actividades programadas y se estima factible completar los objetivos finales con el apoyo sostenido a la institución.

Los objetivos iniciales alcanzados se sintetizan en los siguientes logros:

- Integración en la División de Materias Primas del IPEN de los cuadros orgánicos necesarios para una actuación técnica adecuada e implementación de la correspondiente infraestructura de apoyo logístico-administrativo.

- Organización, equipamiento y puesta en marcha de diversos laboratorios de investigación y apoyo a las actividades de prospección (laboratorios de geoquímica, preparación de muestras para mineralogía-petrografía, gabinetes de fotogeología, topografía, cartografía-dibujo, etc).
- Capacitación y entrenamiento del personal técnico en geología del uranio, y en las metodologías de prospección radiométricas pedestre, autoportada, geoquímica y aérea.
- Primer encuadre tentativo de la favorabilidad geológico-uranífera del Perú, con delimitación, cuantificación y priorización de sus unidades de prospección.
- Dimensionamiento preliminar del Programa Nacional de Prospección y, dada su gran superficie (700 000 km<sup>2</sup>), elaboración de un proyecto del instrumento jurídico que posibilite la participación de terceros en la prospección, bajo el control prioritario de los intereses y seguridad del Estado.

#### 4. ESTIMACION DE LA FAVORABILIDAD GEOLOGICO-URANIFERA DEL PERU

##### 4.1. Reseña de la evolución geológica y sus posibles relaciones con fases del ciclo geoquímico del uranio

En las diversas etapas que integran los distintos “ciclos geológicos” desarrollados en el Perú desde el Precámbrico al Cuaternario, es factible considerar eventuales participaciones del uranio, acorde a las diversas fases que integran su ciclo geoquímico.

Los hem Ciclos endógeno y exógeno de ese ciclo pueden haber participado:

- En las fases de los magmatismos ácidos de sus orogenias paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas, generando zonas de aporte fértil y, eventualmente, depósitos filonianos.
- En los largos períodos de erosión, liberando el posible uranio lábil de las fuentes anteriores y, eventualmente, precipitándolo bajo los modelos de yacencia epigénica mundial en los ciclos de depósitos molásicos, neopaleozoicos, mesozoicos y terciarios.

La evolución geológica del Perú tiene su soporte en un basamento precámbrico cuyas condiciones litoestratigráficas se estima que tienen limitadas expectativas uraníferas, pues no se integra geológicamente en las características de favorabilidad de algunas series proterozoicas conocidas en el Escudo Brasileño. Sobre ese zócalo se dispone el Paleozoico Inferior en una secuencia de sedimentos marinos con una litología predominante areno-pelítica, a veces de facies flyschoides que rellenan un ámbito subsidente ubicado entre el zócalo precámbrico de la costa (macizo de Arequipa) al oeste y el Escudo Brasileño al este. Las facies litológicas de esta secuencia guardan limitadas expectativas de favorabilidad geológico-uranífera,

conociéndose pocos ejemplos de anomalías en la columna litoestratigráfica de esa edad en el edificio andino sudamericano.

En el Paleozoico Superior, la sedimentación se inicia con un caracter molásico parálico, con depósitos marginales de edad carbónica e intercalaciones de facies marinas, detríticas y calcáreas, que culminan con sedimentos molásicos rojos, netamente continentales e intercalaciones de vulcanitas mesosilíceas y ácidas durante el Pérmico. Las diversas fases de la orogenia hercínica, además de sus efectos tectónicos dan lugar a un magmatismo granítico que, pese a su pobre desarrollo aflorante, muestra la presencia de facies intrusivas con especial participación de granitos, granodioritas calcoalcalinas, etc. La favorabilidad uranífera de este período podría estar inducida por el desarrollo de zonas de aporte fértil a nivel de los intrusivos ácidos del magmatismo hercínico y de zonas favorables por su condición de eventual recepción y precipitación del ion uranilo (facies molásicas carbónicas y pérmicas).

En el Triásico se inicia el Ciclo Andino con una secuencia de sedimentos que van hasta el Cretácico Superior constituyendo una columna litológica que se inicia en el Trias con depósitos marinos (calcáreas, areniscas y pelitas bituminosas) y ciclos intercalados de un magmatismo básico a mesosilicio; el Jurásico comienza con una serie continental clástica con más de 1000 m de areniscas rojas (Fm. Sarayaquillo) y marca una condición de sedimentación regional continental con variables locales a depósitos marinos; en el Dogger tiene lugar un evento orogénico que genera el geanticlinal del Maraón y dos cubetas a veces interconectadas, la del oeste hacia el mar abierto, con depósitos de pelitas negras e intercalaciones areniscosas, y la del oriente, que se comporta como una cubeta intracratónica con depósitos detríticos rojos.

La favorabilidad uranífera de esta secuencia quedaría circunscrita a las zonas de recepción que representan las series continentales jurásicas y parcialmente las triásicas.

En el Cretácico Inferior predominó una sedimentación de plataforma y en el Cretácico Superior se desarrolló una secuencia con variables litológicas determinadas por un ordenamiento paleogeográfico que determinó el desarrollo de una sedimentación marina en el ámbito occidental; y depósitos clásticos continentales con intercalaciones marinas locales en el este y sur del Perú.

Durante el Oligoceno, Mioceno y Plioceno se desarrollan depósitos marinos en el norte del Perú e importantes secuencias volcánico-sedimentarias continentales en el oeste y sur del país, con un aporte clástico desde el edificio andino ya estructurado en su actual porción morfoestructural.

La evolución de los ciclos se completa en el Cuaternario con depósitos marinos en la costa, depósitos lacustres y morrénicos en las cadenas de los Andes, e importantes secuencias clásticas continentales en los bordes orientales de la zona subandina.

El magmatismo cenozoico dió lugar al desarrollo de importantes depósitos piroclásticos de carácter ácido a mesosilfíco, cubriendo gran parte del sur y flanco oeste de los Andes.

Nuevamente, las cupla (áreas de probable aporte con los diversos magmatismos descritos del Meso-Cenozoico) y las zonas de recepción (sedimentos clásticos continentales y marginales del Cretácico y Terciario) definen el nivel de favorabilidad de este intervalo geológico.

## 4.2. Definición y delimitación de “Ambientes geológico-uraníferos regionales” y “Unidades de prospección”

### 4.2.1. “Ambientes geológico-uraníferos regionales”

Los análisis de las condiciones geológico-fisiográficas generales del país permitieron establecer una primera delimitación de esos “Ambientes”. Los fundamentos de esa limitación se basaron en la presencia predominante en cada uno de ellos, de determinadas condiciones litoestratigráficas, evolución geotectónica y yacencias estructurales y fisiográficas; lo que coincidió con las principales unidades morfoestructurales del país (Cuadro I).

#### 4.2.1.1. Estimación generalizada de sus favorabilidades uraníferas

Para delinear el grado de sus perspectivas uraníferas se analizaron en esos ambientes los factores genéricos de favorabilidad que surgen del ciclo geoquímico del uranio y de las condiciones de yacencia de sus diversos modelos metalogénicos en el mundo, según detalle:

- a) *Condiciones litológicas.* Necesarias para considerar los parámetros teóricos de su favorabilidad para constituirse en
  - áreas fértiles de aporte de iones uranilo,
  - zonas favorables para la recepción y precipitación del ion uranilo.
- b) *Análisis cronoestratigráfico,* con el fin de correlacionar las unidades geológicas presentes en esos ambientes con los clásicos períodos metalogénicos de movilización y precipitación del uranio (Precámbrico, Neopaleozoico, Mesocenoico).
- c) *Condiciones geomorfológicas y de evolución geotectónica.* Se consideraron en forma generalizada los principales caracteres de la evolución geotectónica y paleogeográfica del país, distinguiendo: el ordenamiento evolutivo de sus diversas fases geosinclinales (con la deposición de sus correspondientes series sedimentarias) y las secuencias de sus diferentes ciclos orogénicos, a fin de relacionarlos con los procesos de movilización, circulación y precipitación del uranio.
- d) *Paragénesis del uranio con otras mineralizaciones.* Se analizó la distribución de las diversas mineralizaciones del país y sus eventuales asociaciones con las

## CUADRO I. AMBIENTES GEOLOGICO-URANIFEROS REGIONALES

Ambiente	Localización	Superficie km <sup>2</sup>
I	Cordillera de la Costa	30 050
II	Faja costanera	90 050
III	Cordillera Occidental	287 550
IV	Cordillera Oriental	167 950
V	Puno	38 950
VI	Faja subandina	208 700
VII	Llano amazónico	491 966
Total		1 286 216

anomalías de uranio conocidas a la fecha a fin de integrarlas al cuadro geológico de los ambientes de su yacencia.

Se logró así una estimación preliminar de sus perspectivas uraníferas que son tratadas en las siguientes descripciones de los Ambientes:

#### 4.2.1.2. Descripción de los Ambientes

##### *Ambiente I. Cordillera de la Costa (30 050 km<sup>2</sup>)*

Está integrado por dos fajas costaneras ubicadas al norte y sur del país, y discontinuado en la parte central por la escotadura de la costa. Morfológicamente está integrado por serranías bajas (hasta 1000 m), y geológicamente se encuentra presente en la faja sur un basamento metamórfico precámbrico, atravesado por intrusivos ácidos, mesosilícicos y básicos, cubiertos por una secuencia de afloramientos dispersos de sedimentos continentales y marinos del Mesozoico y Cenozoico. En el sector norte, el substrato está formado por rocas del Paleozoico y sedimentos del Cretácico-Terciario. Ambas zonas están afectadas por una tectónica de plegamiento y fallamiento.

En el sector norte, las perspectivas uraníferas se limitarían a las facies de sedimentos continentales del Paleozoico Superior y a los stocks de plutones jurásicos que los intruyen. Los depósitos marinos del Cretácico y Terciario serían menos favorables, dados los limitados modelos metalogénicos conocidos en el

mundo para este tipo de sedimentos. En el sector sur, la favorabilidad se circunscribiría a los sedimentos del Neopaleozoico y a algunos stocks intrusivos y volcánicos ácidos y mesosílicos del Jurásico, Cretácico y Terciario.

En ambos sectores el clima es hiperárido, desértico y con grandes zonas cubiertas con sedimentos modernos. Existen condiciones aceptables de infraestructura regional para dar apoyo a una operación sistemática de prospección.

### *Ambiente II. Faja costanera (90 050 km<sup>2</sup>)*

Cubre el faldeo bajo de la Cordillera Occidental hasta la costa del Pacífico. En la región septentrional afloran sedimentos marinos terciarios y en las áreas central y norte complejos volcánicos sedimentarios del Jurásico y Cretácico, intruídos por plutones ácidos, mesosilíceos y, en menor proporción, básicos del Batolito andino. En el sector sur afloran sedimentos terciarios continentales, de la cuenca de Moquegua, cubiertos por depósitos modernos fluviales y principalmente eólicos.

Los amplios afloramientos de las rocas intrusivas ácidas y mesosilíceas del Batolito andino y las efusivas de igual naturaleza del Cretácico-Terciario poseen condiciones genéricas de favorabilidad uranífera, pudiendo constituirse en áreas fértiles de aporte y eventual precipitación de ese elemento en sus propias estructuras. La amplia cubeta sedimentaria con sedimentos terciarios (formación Moquegua) tiene condiciones de favorabilidad por extrapolación a los modelos de "uranio en areniscas". Se excluyen como zonas de interés las amplias regiones cubiertas con depósitos modernos (eólicos y fluviales).

En los afloramientos las rocas no están alteradas, lo que revela condiciones limitadas para un quimismo que haya posibilitado la liberación de iones metálicos.

El clima es árido y no existe vegetación, salvo en los valles (verdaderos oasis) que cruzan el ambiente de E a O y son portadores de aguas permanentes desde las cumbres de la cordillera occidental. Posee buenas condiciones de infraestructura para dar apoyo a un programa normal de prospección.

### *Ambiente III. Cordillera Occidental (287 550 km<sup>2</sup>)*

Es la unidad morfológica montañosa principal del país, con su eje paralelo a la cadena andina; sus alturas varían de 3000 a 4000 m y máximas de 6700 m.s.n.m. El flanco occidental presenta una amplia exposición de rocas volcánicas (ácidas y mesosilíceas) del Cretácico Superior-Terciario, que cubren depósitos detríticos de similar edad y series marinas del Jurásico-Cretácico. El conjunto está atravesado por intrusivos (ácidos, mesosilíceos y básicos) del Batolito andino. En el flanco oriental predominan sedimentos marinos Triásico-Jurásico y del Cretácico Medio Superior en los que se intercalan secuencias detríticas continentales del Cretácico Inferior y Terciario Inferior. El sector occidental muestra una deformación en

pliegues relativamente cerrados; el oriental está plegado más suavemente y fallado como el anterior. Se observan restos de la superficie peneplanizada de la Puna (4000 m.s.n.m.).

Las expectativas uraníferas se limitarían a los sedimentos continentales cretácicos y a los depósitos intramontanos terciarios. A ellos se subordinan las zonas con afloramientos marinos del Jurásico y Cretácico. De eventual interés como fuentes de aporte son los amplios afloramientos de intrusivos ácidos y mesosilícicos del Batolito andino y los volcánicos similares del Cretácico-Terciario. Los afloramientos de tobas y lavas ácidas del Plioceno y Pleistoceno tendrían un interés potencial, dadas sus condiciones similares a las del Altiplano boliviano, donde se ubican los modelos metalogénicos del distrito uranífero de Sevaruyo.

Existen regulares condiciones de favorabilidad de explotación para apoyo de un plan de prospección.

#### *Ambiente IV. Cordillera Oriental (167 950 km<sup>2</sup>)*

El substrato constituido por rocas metamórficas de alto grado del Precámbrico y ectinitas del Ordovícico está cubierto por una secuencia de sedimentos continentales y marinos del Permo-Carbónico, sobre los que se apoyan otras series detríticas y químicas del Mesozoico y Terciario. Alturas variables entre 2000 y 4000 m y máximas de 6000 m conforman un relieve montañoso con sectores peneplanizados de la superficie "Puna" y un relieve general de rejuvenecimiento después de que la tectónica andina lo elevó a su actual altura.

La favorabilidad geológico-uranífera se ligaría a los depósitos intermontanos, a los sedimentos clásticos continentales del Cretácico Inferior y Paleozoico Superior (grupo Ambo).

Las rocas metamórficas de bajo grado del Paleozoico Inferior (sector sur) tendrían perspectivas locales, donde las condiciones geomorfológicas diesen el cuadro clásico de favorabilidad con superficies de discordancia y enclaves en zonas fértiles de aporte de iones uranilo.

El clima es semiárido, con un período de lluvias entre noviembre y marzo que ha provocado un intemperismo (quimismo en especial) de las rocas aflorantes. Posee regulares condiciones de explotación para apoyo de una operación de prospección.

#### *Ambiente V. Puno (38 950 km<sup>2</sup>)*

Unidad morfoestructural del Altiplano peruano-boliviano; su peneplanización durante el Mioceno dió lugar a amplias superficies subhorizontales elevadas por efectos de la tectónica andina a las cotas actuales (unos 4000 m). Sobre esta superficie existen serranías suaves, conos volcánicos y algunos relieves rejuvenecidos por efecto de una neotectónica cuaternaria.

Sobre un substrato eopaleozoico poco aflorante se disponen depósitos detríticos del Paleozoico Superior e importantes secuencias de sedimentos continentales de edad cretácica y terciaria; potentes series volcano-sedimentarias del Terciario superior y del Terciario-Cuaternario completan el cuadro geológico de este ambiente, que la tectónica andina plegó suavemente y fracturó localmente.

Condiciones de favorabilidad geológico-uranífera se ubicarían en las potentes series de sedimentos continentales del Cretácico y Terciario y los depósitos detríticos del Paleozoico superior y series volcánicas (derrames y piroclásticas) del Terciario-Cuaternario.

El clima es árido, seco y frío en invierno y lluvioso de noviembre a marzo; la vegetación es escasa a nula; el intemperismo de las rocas aflorantes por alteración química es importante.

#### *Ambiente VI. Faja Subandina (208 700 km<sup>2</sup>)*

Coincide con el flanco occidental de la cuenca de sedimentación amazónica, emplazada entre el basamento cristalino del Brasil y la Cordillera Oriental del Perú. Morfológicamente se corresponde con una estructura de montañas rejuvenecidas ( $\pm 2000$  m) con adosamiento tectónico a la cordillera oriental, mediante un primer alineamiento de serranías bajas o bloques tectónicos (1000–1500 m) y luego zonas llanas con leve pendiente al este (500–600 m).

Presenta un substrato paleozoico poco aflorante (Cordillera del Shira), cubierto por potentes series de sedimentos detríticos continentales del Cretácico-Terciario. Sobre el frente oeste aparecen parte de los intrusivos ácidos paleozoicos y terciarios de la Cordillera Oriental.

La favorabilidad geológico-uranífera estaría emplazada en la amplia secuencia de sedimentos continentales del Cretácico Inferior y Terciario Inferior a Superior donde se han constatado parámetros litológicos uraníferos favorables (granulometría, cemento, decoloración, presencia de materia orgánica, permeabilidad).

El clima es húmedo y cálido con elevado régimen de lluvias en verano; cubre el ambiente una selva espesa y se constata un importante intemperismo de las rocas.

Posee condiciones de infraestructura limitadas para apoyo de una operación normal de prospección.

#### *Ambiente VII. Llanura amazónica (461 966 km<sup>2</sup>)*

Está cubierto por depósitos cuaternarios y afloramientos aislados de sedimentos continentales del Terciario y Cretácico. El relieve es llano, de menos de 500 m.s.n.m., con esporádicas sierras aisladas de baja altura. Una selva espesa y amplias zonas con terrenos anegados reducen las perspectivas del ambiente. El clima es tropical húmedo y carece casi totalmente de condiciones para apoyo de un programa de prospección.

## CUADRO II. UNIDADES DE PROSPECCIÓN

Ambiente geológico-uranífero	Unidad de prospección	Superficie km <sup>2</sup>	Subtotales
I			
CORDILLERA DE LA COSTA	1. Tumbes	16 200	30 050
	2. Chala Mollendo	13 850	
II			
FAJA COSTANERA	1. Chiclayo	30 000	90 050
	2. Lima Norte	13 700	
	3. Ica	22 450	
	4. Moquegua	23 900	
III			
CORDILLERA OCCIDENTAL	1. Santa Cruz	28 700	287 550
	2. Cajamarca	14 650	
	3. Pomabamba	28 200	
	4. Recuay	25 600	
	5. Matucana	29 300	
	6. Huancavelica	23 100	
	7. Puquio	27 900	
	8. Abancay	30 800	
	9. Chiyay	34 300	
	10. Caraveli	16 600	
	11. Arequipa	28 400	
IV			
CORDILLERA ORIENTAL	1. Chachapoyas	16 850	167 950
	2. Bolívar	17 800	
	3. Monzón	18 300	
	4. Cerro de Pasco-Huancayo	17 800	
	5. Huánuco	21 000	
	6. Paucartambo	47 150	
	7. Sandia	29 050	
V			
PUNO	1. Puno	38 950	38 950
VI			
FAJA SUBANDINA	1. Moyobamba	39 800	208 700
	2. Mendoza	27 900	
	3. Juanjui	38 100	
	4. Tingo María-Oxapampa	44 950	
	5. Shira	19 250	
	6. Urubamba	27 900	
	7. Alto Madre de Dios	10 800	
VII			
LLANO AMAZONICO	1. Iquitos	302 630	416 966
	2. Orellana	18 800	
	3. Puerto Maldonado	140 516	
Superficie total			1 285 216

CUADRO III. PARAMETRO DE FAVORABILIDAD – ROCAS  
SEDIMENTARIAS

PARAMETROS	VALORIZACION PARCIAL DE FAVORABILIDAD GEOLOGICO-URANIFERA		CUANTIFICACION TOTAL MAX.	
Ambiente de depositación	Continental	{ Fluvial	0,2	0,2
		{ Deltaico	0,2	
		{ Eólico	0,2	
		{ Lacustre	0,15	
	Marino	{ Marginal	0,15	
		{ Profundo	0,05	
Litología	Tipo de rocas	{ Rudita (conglomerado)	0,2	0,4
		{ Psamita (arenisca)	0,2	
		{ Pelitas (arcilla-lutita)	0,05	
		{ Bioquímicos (caliza)	0,05	
		{ Evaporita (yeso, sal)	0,05	
	Permeabilidad	{ Con cemento no friable	0,05	
		{ Sin matriz, friable	0,2	
	Estructuras sedimentarias	Entrecruzamientos (láminas largas, cortas)		0,1
Canalizaciones		0,1		
Sedimentación normal		0,05		
Agentes reductores	Materia carbonosa: frondas, troncos, niveles de carbón, bitúmen, pirita, gas H <sub>2</sub> S		0,1	0,2
	Acción bacterial anaeróbica			
	Alteraciones: Decoloración (recoloración)		0,1	
	Limonitización			
	(Hematización)			
Rasgos estructurales regionales	Discordancia, piso, techo		0,05	0,1
	Fallamiento, fracturamiento		0,03	
	Buzamiento, plegamiento	{ 0-20 suave	0,05	
		{ 20-45 moderado	0,02	
		{ 45-90 fuerte	0,00	
MAXIMO GRADO DE FAVORABILIDAD				1,0

**CUADRO IV. PARAMETRO DE FAVORABILIDAD – ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS**

PARAMETROS	VALORIZACION PARCIAL DE FAVORABILIDAD GEOLOGICO – URANIFERA	CUANTIFICACION TOTAL MAX.	
Ambiente	Intrusivo	0,2	
	Volcánico	0,2	0,2
	Metamórfico	0,1	
Litología	Igneo ácido (silíceo)	0,3	
	Igneo mesosilíceo	0,2	
	Igneo básico	0,05	0,3
	Metamorfismo bajo grado	0,1	
	Metamorfismo alto grado	0,05	
Rasgos estructurales	Discordancia	0,1	
	Fallamiento	0,05	
	Fracturamiento y diaclasamiento (brechas)	0,1	0,2
	Coladas, tufos y piroclásticos	0,1	
Agentes reductores	Sulfuros, piritita	0,1	
	H <sub>2</sub> S, óxidos	0,1	0,2
	Anomalías conocidas de U	0,2	
Asociaciones minerales	Relaciones paragenéticas del uranio con otros metales fluorita, Ni-Co, Ag, Cu, etc.	0,1	0,1
MAXIMO GRADO DE FAVORABILIDAD			1.0

#### 4.2.2. “Unidades de Prospección”

La extensión de los “Ambientes geológico-uraníferos regionales”, la amplia gama de sus condiciones geológicas, litoestratigráficas, geomórficas, etc. y el variado nivel de favorabilidad susceptible de asignar a las diversas entidades geológicas de un mismo ambiente, marcaron la necesidad de delimitar dentro de cada uno de ellos una serie de entidades menores a las que se denomina: “Unidades de prospección”. Se utilizaron los mismos criterios y parámetros geológicos para su correspondiente delimitación y se lograron reconocer 35 Unidades (Cuadro II).

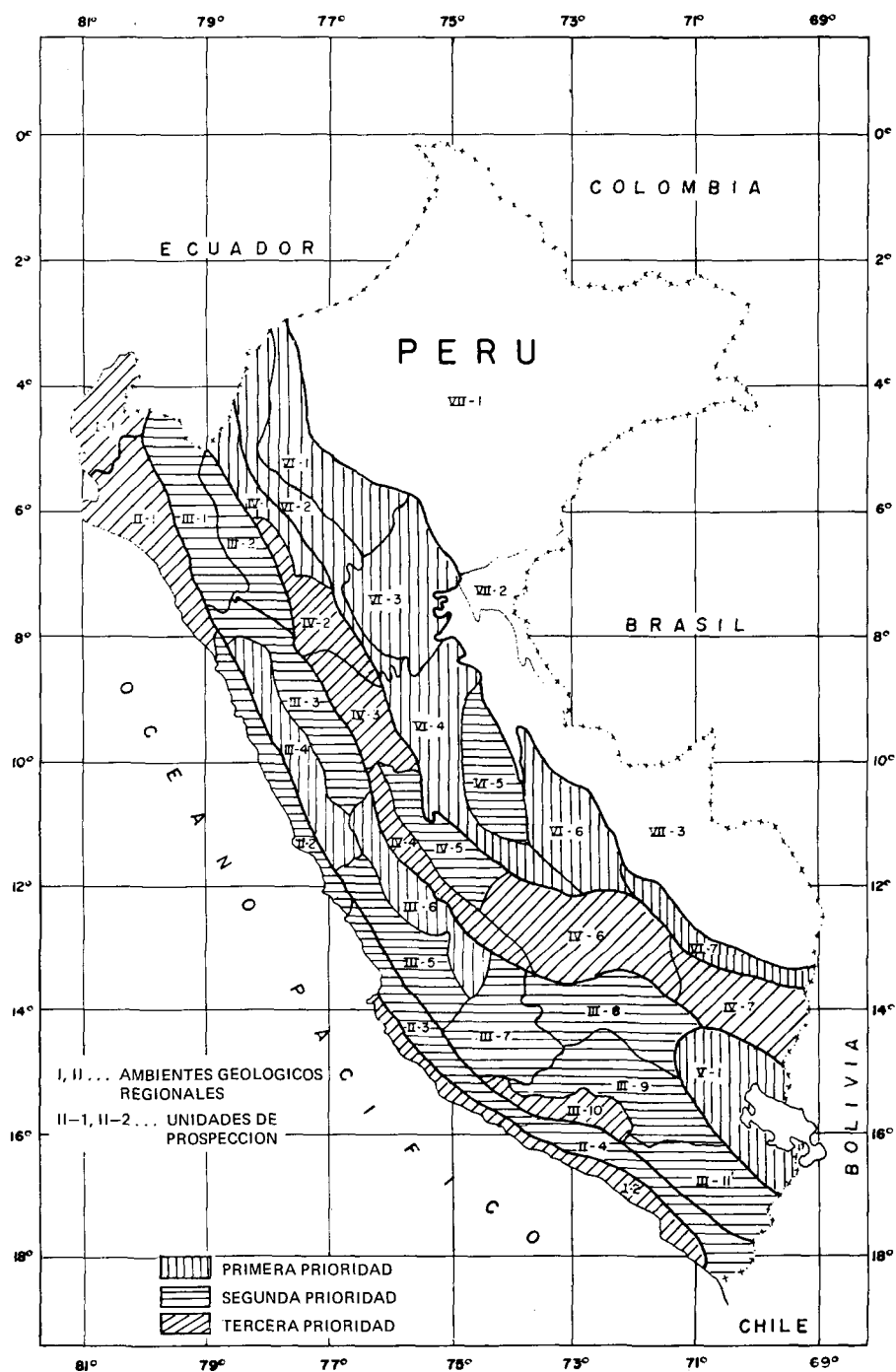


FIG.2. Evaluación por prioridades de los recursos uraníferos del Perú.

**CUADRO V. ORDENAMIENTO DE LAS UNIDADES DE PROSPECCION SEGUN NIVELES DE PRIORIDAD**

Nivel de prioridad	IFGU	Unidades de prospección	Superficie km <sup>2</sup>	Promedio IFGU
1	1,0–0,6	10	271 650	0,62
2	0,6–0,4	14	327 950	0,51
3	<0,4	8	143 350	0,37

#### 4.3. Cuantificación del “Índice de favorabilidad geológico-uranífera” (IFGU) de las Unidades de prospección

Para lograr clasificar las “Unidades de prospección” según un ordenamiento prioritario se estimó necesario valorar sus parámetros de favorabilidad geológico-uranífera, cuantificándolos de acuerdo con la importancia con que intervienen en la yacencia de los modelos metalogénicos conocidos en el mundo (cuerpos peneconcordantes, rolls, “amás”, vetiformes, etc).

Como metodología de evaluación se estimó conveniente adecuar algunos principios básicos de las técnicas de la investigación operativa en computación; en este caso se utilizó la simulación discreta de modelos, teoría de juegos, etc., cuyas bases teóricas se fundan en principios de simulación de modelos presentes en la naturaleza. El objetivo de estas técnicas es minimizar el valor de la “varianza”, concepción estadística que en este caso se asimila al IFGU. Los parámetros utilizados en esta cuantificación se refirieron de forma particular y separada a los ambientes de origen de las unidades geológicas a considerar y acorde al detalle de los Cuadros III y IV.

Cada Unidad de prospección fue analizada en forma detallada a nivel de las unidades geológicas (formaciones, grupos, etc.) presentes en las mismas.

Las cifras obtenidas con esta valorización fueron integradas y promediadas a nivel de cada Unidad de prospección, hasta obtener el valor IFGU para cada una de ellas.

Se procedió luego a un ordenamiento de las Unidades de prospección sobre tres niveles de prioridades. Se excluyeron en este análisis las 3 unidades en que fue dividido el Ambiente VII, Llano amazónico, dado que forman parte de una zona llana, con cobertura moderna, espesa selva, poca infraestructura de apoyo y escasa información geológico-uranífera.

Los resultados de este ordenamiento se sintetizan en el Cuadro V (véase también la Fig. 2).

# AMBIENTES FAVORABLES PARA LA DEPOSICION DE URANIO EN LA FAJA SUBANDINA Y LLANO AMAZONICO DEL PERU

L. CANEPA, F. ROSADO

División de Materias Primas,  
Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN),  
Lima, Perú

## Abstract-Resumen

### FAVOURABLE ENVIRONMENTS FOR THE DEPOSITION OF URANIUM IN THE SUB-ANDEAN BELT AND THE AMAZON PLAIN OF PERU.

The area described is located between the east flank of the eastern Cordillera on the territorial limits with Ecuador, Colombia, Brazil and Bolivia. It covers the morphological areas called sub-Andean zone and Amazon plain. The physiographic characteristics change from west to east. In the eastern Cordillera the morphology is rough, with altitudes of 5000 m. Descending to sub-Andean, it presents a moderate topography with low hills between 1000 and 2500 m. Further east the Amazon plain forms an extensive peneplain with altitudes of 400 m. The stratigraphy of the area includes rocks with ages from the Precambrian (eastern Cordillera) to recent. Outcrops of the Palaeozoic formations are found to the east of the eastern Cordillera. Rocks that belong to the Mesozoic and Cenozoic are extensively distributed in the area, as deposits of continental or deltaic facies. The geological evolution of the area is favourable for the formation of stratiform deposits of uranium. The intensity of the orogenic deformation decreases progressively from west to east. The tendency to low dips favours the conditions of migration and precipitation of uranium. The majority of the geological formations of continental and deltaic origin, as well as igneous bodies of upper Palaeozoic and Tertiary age, have been selected as rocks of good geological uranium favourability, taking into consideration criteria found in other parts of the world. These have been modified to suit local conditions. This area presents similar geological conditions to the eastern side of the Andean Cordillera in Argentina where a number of uranium deposits have been located.

### AMBIENTES FAVORABLES PARA LA DEPOSICION DE URANIO EN LA FAJA SUBANDINA Y LLANO AMAZONICO DEL PERU.

El área objeto del presente trabajo se ubica entre el flanco este de la Cordillera Oriental y los límites territoriales con Ecuador, Colombia, Brasil y Bolivia y comprende las zonas morfológicas denominadas Faja Subandina y Llano Amazónico. Los rasgos fisiográficos varían de oeste a este. En la Cordillera Oriental la morfología es agreste, con alturas de 5000 m sobre el nivel del mar. En la Subandina presenta relieves más suaves, con cerros cuyas alturas varían entre 2500 y 1000 m. Hacia el este, el Llano Amazónico forma una vasta penillanura con alturas de 400 m. La columna estratigráfica de la zona comprende rocas que van desde el Precámbrico (Cordillera Oriental) al reciente. Las formaciones paleozoicas afloran al este de la Cordillera Oriental. Rocas pertenecientes al Mesozoico y Cenozoico se

encuentran extensamente distribuidas en la zona de estudio, dentro de las que se distinguen los yacimientos de facies continental y deltaica. La evolución geológica del área coadyuva a la formación de yacimientos de uranio de tipo estratiforme. La intensidad de las deformaciones orogénicas decrece progresivamente de oeste a este. La tendencia a posiciones estructurales de bajo ángulo favorece las condiciones de migración y precipitación del uranio. La mayoría de las formaciones geológicas de origen continental deltaica, así como cuerpos ígneos de edades pertenecientes al Paleozoico Superior y Terciario han sido preseleccionados como rocas de buena favorabilidad geológico-uranífera, teniendo en cuenta criterios encontrados en otros ámbitos que rigen a nivel mundial y adaptados a las condiciones locales. Esta zona presenta condiciones geológicas similares a las de los yacimientos ubicados en la parte oriental de la Cordillera de los Andes de la Argentina.

## 1. UBICACION

El área objeto del presente estudio se ubica en el sector este de la Cordillera Oriental (Fig. 1) y comprende las zonas morfoestructurales denominadas Cordillera Subandina, Montañas del Shira, Llanura Amazónica y Llanura de Madre de Dios.

## 2. FISIOGRAFIA

Los rasgos fisiográficos se agrupan en unidades con características definidas:

- 1) Cordillera Subandina. Dentro de esta unidad se ha incluido a la Cordillera Subandina propiamente dicha y a las montañas del Shira, por presentar características morfológicas similares. Estas se caracterizan por estar ubicadas inmediatamente en el flanco este de la Cordillera Oriental, y se proyectan hacia el este hasta el Llano Amazónico. Presentan una topografía abrupta con alturas máximas de 3700 m.s.n.m.
- 2) La Llanura Amazónica. Esta unidad comprende la llanura del Amazonas propiamente dicha y la de Madre de Dios, ya que ambas conforman las tierras bajas de la zona, presentando una superficie poco accidentada, con pequeñas lomas cuyas alturas varían entre 100 y 400 m.

Tanto la Cordillera Subandina como la Llanura Amazónica presentan clima biestacionario con dos estaciones bien marcadas; la época de verano con fuertes lluvias y la época de invierno con períodos de sequía.

Los vientos tienen direcciones de este a oeste y se estrellan con la Cordillera Oriental que sirve de barrera natural. En las zonas altas de la Cordillera Subandina la precipitación es constante la mayor parte del año, y el sistema de drenaje vierte sus aguas en el río Amazonas.

Terrazas aluviales, pequeñas elevaciones, coberturas aluviales, etc. sirven de suelo a extensas coberturas boscosas, que se extienden por ambas zonas. Estos mantos boscosos forman selvas características de las zonas tropicales.

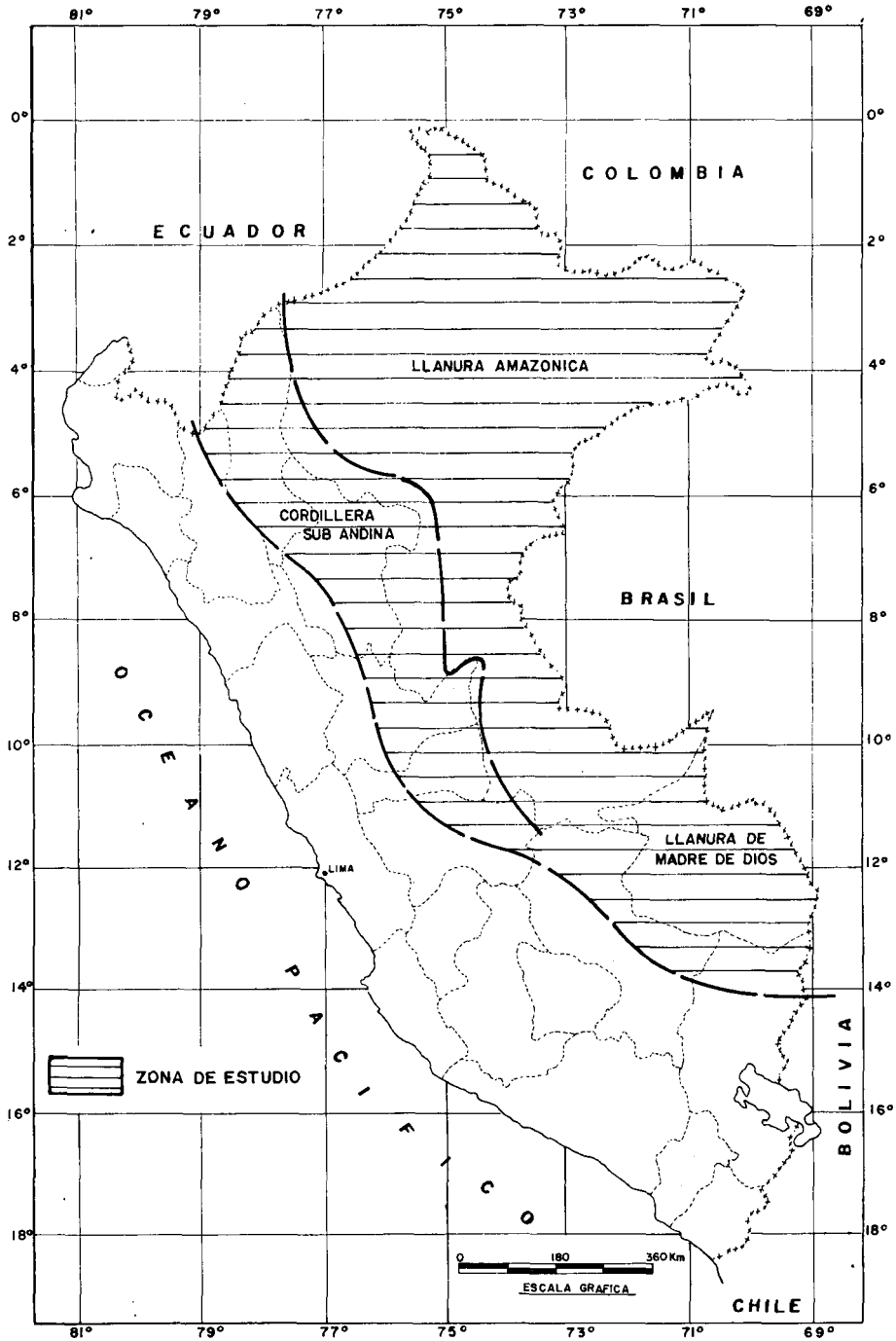


FIG.1. Ubicación de la zona de estudio.

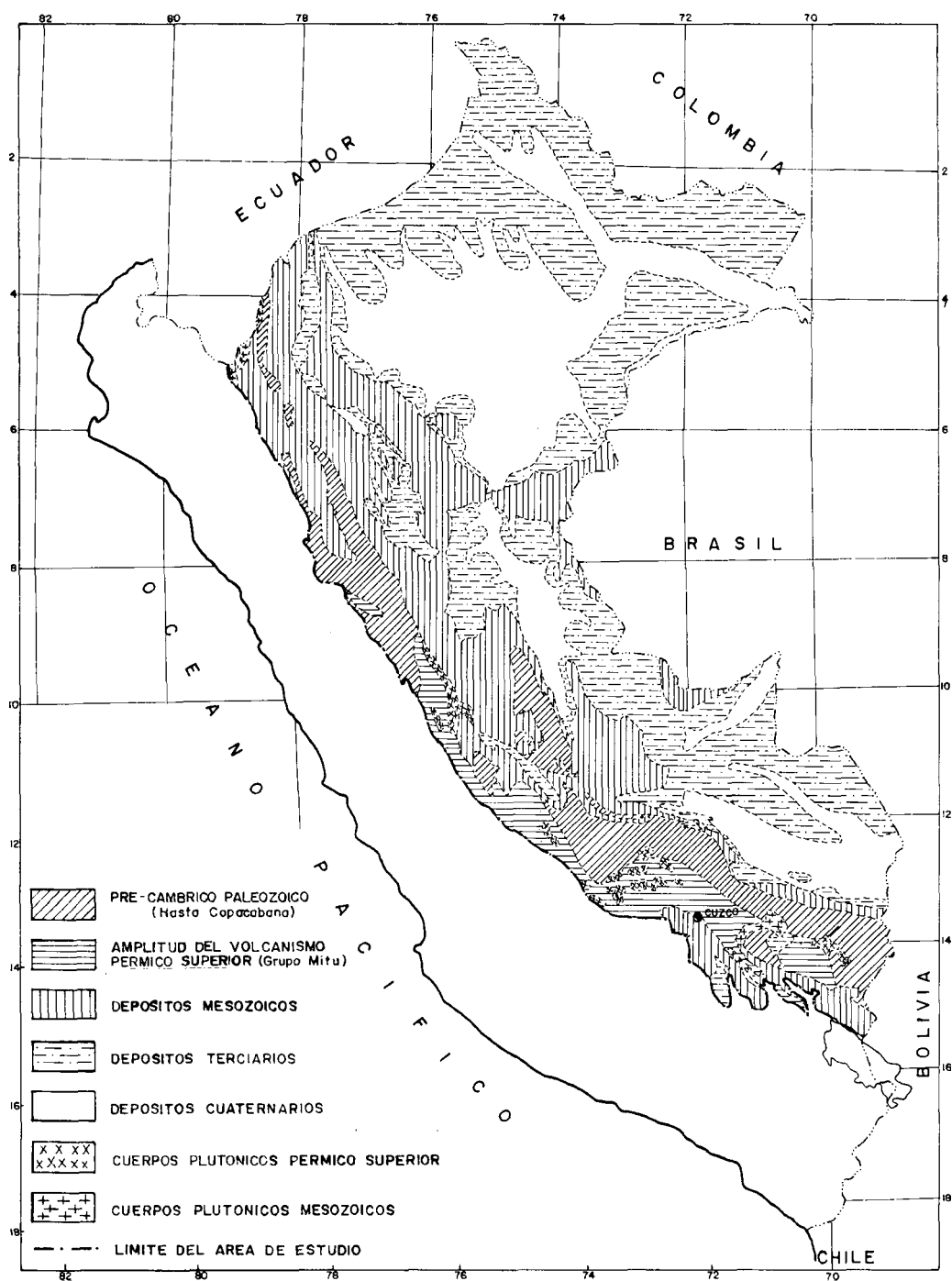


FIG.2. Mapa geológico generalizado de la Cordillera Oriental, Faja Subandina y Llano Amazónico.

### 3. RESEÑA ESTRATIGRAFICA

Las rocas más antiguas en esta parte de la Cordillera Oriental (Fig. 2) son de edad precámbrica y han sido clasificadas en forma general como de tipo intermedio, de baja presión; van desde las facies de los esquistos verdes a las facies de anfibolita, litológicamente compuesta por gneises, micácitas, anfibolitas y filitas, afectadas por tres fases orogénicas.

La depositación de rocas de edad paleozoica se inicia con sedimentos marinos de edad ordovícica, litológicamente compuestos por lutitas que, en la mayoría de los casos son fosilíferas. Hacia la Cordillera Oriental cambian progresivamente a pizarras y parcialmente a cuarcitas.

Durante el Silúrico-Devónico se depositan areniscas y lutitas carbonosas a veces turbidíticas. En la Cordillera Oriental se incrementa progresivamente el grado de metamorfismo, pasando a pizarras carbonosas.

El Paleozoico Superior se inicia con la sedimentación del Grupo Ambo, compuesto por un conglomerado basal, siguiendo cuarcitas, areniscas y lutitas, que alternan con delgadas capas de carbón y plantas.

El Pensilvaniano está representado por el Grupo Tarma, compuesto por lutitas grises, negras verdosas; limolitas y calizas claras bastante fosilíferas. En la Faja Subandina la deposición se suspende a mediados del Pensilvaniano mientras que en el Llano Amazónico y subcuenca de Madre de Dios la sedimentación continúa y pasa transicionalmente al grupo Copacabana, compuesto por calizas grises fosilíferas con variaciones a dolomitas en bancos gruesos y masivos. En el Pérmico Superior se depositan sedimentos continentales del Grupo Mitu.

La sedimentación mesozoica se inicia con la deposición marina de rocas de edad triásico-jurásica del Grupo Pucará, de amplia distribución en la zona occidental del área; litológicamente se compone de calizas grises, con niveles intermedios arenosos. Pasa lateralmente a los depósitos salubres continentales de Sarayaquillo: (Boquerón del Padre Abad), en forma de areniscas rojas, con estratificación cruzada, horizontes conglomerádicos y lutitas rojas.

Al iniciarse la sedimentación cretácica en la Faja Subandina y Llano Amazónico existían una serie de pequeñas cuencas (Fig. 3) que fueron cubiertas por depósitos aluviales y deltaicos: la formación Cushabatay, compuesta por areniscas blancas, cuarzosas que en muchos lugares alternan con lutitas limosomíceas con restos de vegetales y horizontes carbonosos. Transicionalmente, Cushabatay pasa a la formación Esperanza de ambiente marino, compuesta por lutitas negras fosilíferas y delgadas intercalaciones de calizas, la que secuencialmente pasa a la formación Aguas Calientes, litológicamente compuesta ésta por areniscas blancas con intercalaciones de lutitas negras carbonosas y restos de plantas.

La formación Chonta, de carácter transgresivo, está compuesta por lutitas, margas, calizas negras a grises con delgados lechos de areniscas calcáreas muy

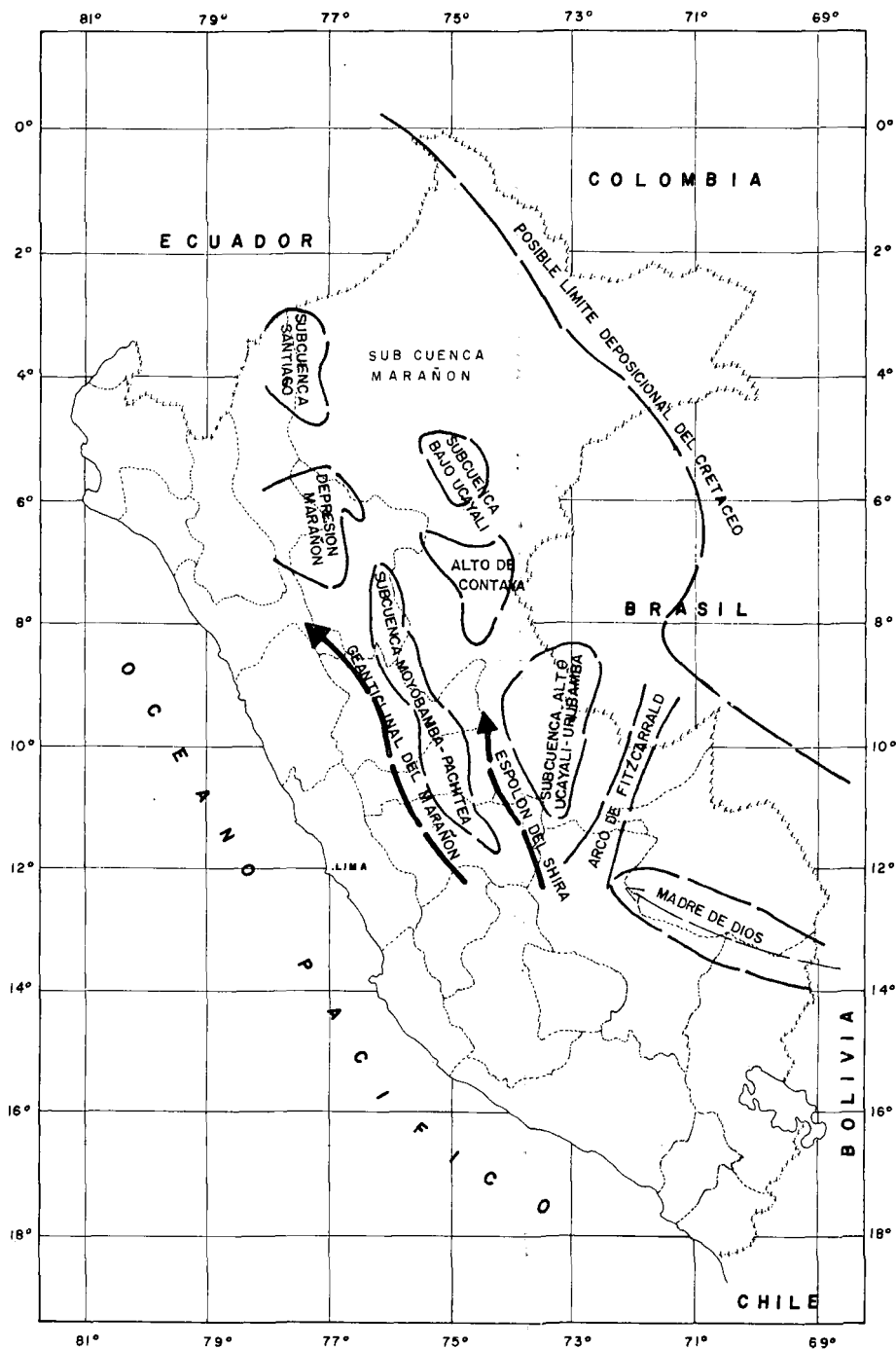


FIG.3. Mapa paleotectónico del Cretáceo. Faja Subandina y Llano Amazónico.

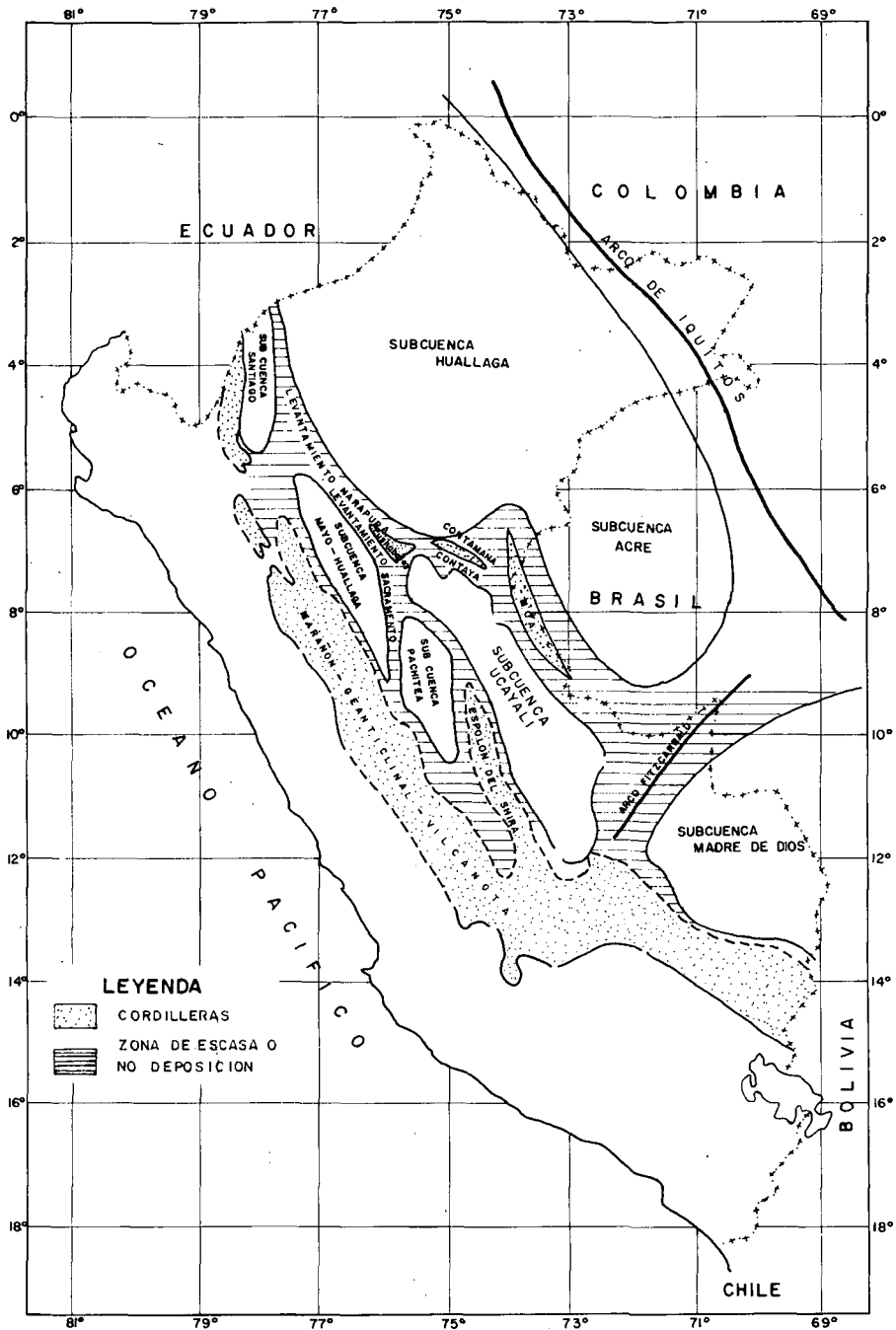


FIG.4. Cuencas terciarias continentales del oriente peruano.

fosilíferas; concordantemente a la formación Chonta se depositó la unidad Vivían, compuesta por areniscas blancas y amarillas de grano grueso a conglomerádico con delgados lechos de lutitas negras y restos de plantas.

A fines del Cretáceo se produce la sedimentación transgresiva-regresiva con la depositación de las formaciones Cachiyacu-Huchpayacu, compuestas por lutitas negras, arcillas, margas y limolitas rojizas, algunas veces calcáreas.

Los sedimentos de esta última formación continúan depositándose en una serie de subcuencas (Fig. 4) durante el Terciario Inferior, prolongándose el ciclo sedimentario desde el Cretáceo tardío.

El Terciario Inferior está representado por el Grupo Huayabamba, dentro de este se distinguen las formaciones Yahuarango, Pozo y Chambira.

La unidad Yahuarango es la continuación del ciclo sedimentario cretácico, depositada en un ambiente marino-marginal o de estuario y lacustre.

La formación Pozo representa al avance marino producido durante el Oligoceno. Litológicamente está compuesta por lutitas grises, carbonosas, interestratificadas con capas delgadas de calizas grises, con escasa proporción de areniscas. La base de esta formación se caracteriza por presentar las areniscas tobáceas denominadas formación Casablanca, de reducida distribución geográfica.

La fase regresiva de la transgresión marina oligocénica está representada por la formación Chambira, que hacia la zona de Tarapoto se vuelve más arenosa.

La sedimentación continental se define con la depositación de la formación Ipururo, compuesta por lutitas, lodolitas, areniscas tobáceas ocasionales con lentes conglomerádicos. Las correlaciones de las unidades estratigráficas del Paleozoico, Mesozoico-Cenozoico de la Faja Subandina-Llano Amazónico se presentan en los Cuadros I y II.

#### 4. GEOLOGIA HISTORICA

El Escudo Brasileño sirvió de soporte a sedimentos de edad paleozoica cuya deposición se inició como consecuencia de la transgresión acaecida durante el Ordovícico (Llanvirniano), la que duró hasta principios del Silúrico; este evento fue seguido por la no deposición del Silúrico Medio y Superior, mientras que en el sur (Dptos. de Puno y Cusco, Bolivia) se depositaba el horizonte tillítico del Zapla [1]. La deposición continuó con la transgresión marina, producida a fines del Silúrico, que terminó en el Devónico Medio. A fines del Devónico se produce la orogenia eohercínica que pone fin al Paleozoico Inferior.

Después de un fuerte período de erosión, el Paleozoico Superior se inicia con la deposición del Grupo Ambo, de ambiente continental tipo parálco. Breves incursiones marinas depositan sedimentos de facies neríticas, que conforman la sección media de la formación; el tope del Grupo Ambo está limitado por niveles de piroclásticos. El Grupo Ambo es afectado por un fuerte período de

erosión que culmina al sumergirse el continente por efecto de movimientos epirogénicos producidos en el Pensilvaniano, que ocasionan una transgresión marina con la consiguiente deposición de la formación Tarma.

A fines del Pensilvaniano emerge nuevamente al continente produciéndose un proceso de intensa erosión [2]. Al iniciarse el Pérmico, los mares pasan de norte a sur, produciéndose la deposición de las calizas Copacabana, hecho que continúa hasta el Pérmico medio en que emerge la cuenca y se produce la orogenia tardihercínica, de escasa intensidad en la Región central [3], con manifestaciones de movimientos epirogenéticos, mientras que en el sur se producía con regular intensidad.

El Grupo Mitu se deposita en relieves abruptos formados en tiempos post-orogénicos (tardihercínicos). Está conformado por depósitos de facies continentales de ambientes oxidantes, compuestos por sedimentos de carácter aluvial que manifiestan fuerte energía de deposición (avenidas torrenciales), con períodos alternos de aridez e intensa oxidación.

En la zona central del Perú se han observado movimientos compresionales de carácter local que han plegado al Grupo Mitu [3]. Los límites orientales de la formación se ubican en áreas cercanas al límite este de la Cordillera Subandina, pero no se proyecta hacia el Llano Amazónico.

Durante gran parte del Triásico, el territorio estuvo sometido a un largo período de erosión y peneplanización que termina a fines del Triásico (Norian), al producirse la transgresión que depositará la formación Pucará. Estas condiciones duran hasta el Liásico Medio en que, por acción de movimientos epirogenéticos, emerge la cuenca, produciéndose una posterior erosión y la depositación de la formación Sarayaquillo de ambiente continental. Este se prolonga hasta fines del Jurásico en que se inicia un fuerte período de erosión que continúa hasta el Neocomiano.

La depositación del Cretáceo se inicia con la sedimentación de la formación Cushabatay, que tuvo lugar en ambientes de tipo marginal a continental, formándose depósitos deltaicos, lacustrinos y de estuarios. A continuación una breve transgresión deposita sedimentos marinos, denominados formación Esperanza. Culminado el corto período transgresivo, se deposita la formación Aguas Calientes, que presenta un carácter transgresivo-regresivo, con sedimentos de tipo marginal a continental. A estas 3 formaciones cretáceas se les agrupa dentro del grupo Oriente, cuya deposición termina al iniciarse la transgresión marina producida en el Cretáceo Inferior tardío y parte inferior del Cretáceo Superior; así, en la mayor parte del país se depositan los sedimentos marinos de la formación Chonta, que de norte a sur corta líneas de tiempo. En el Cretáceo Superior se produce la transgresión regresiva cretáceo-terciaria con la depositación de la formación Vivián, de ambientes deltaicos y lacustrinos, y la formación Cachiyacu, predominantemente arcillosa de ambiente marino marginal.

CUADRO I. TABLA DE CORRELACION DE LAS UNIDADES ESTRATIGRAFICAS DEL PALEOZOICO DE LA FAJA SUBANDINA-LLANO AMAZONICO DEL ECUADOR, PERU Y BOLIVIA

ERA	SISTEMA SERIE		CORDILLERA ORIENTAL			LLANO AMAZONICO			BOLIVIA COCHABAMBA
			NORTE	CENTRO	SUR	SUB-CUENCA MARANON	SUB-CUENCA UCAYALI	SUB-CUENCA MADRE DE DIOS	
P A L E O Z O I C O	S U P E R I O R	SUPERIOR	Grupo Mitu	Grupo Mitu	Grupo Mitu	Grupo Mitu	Grupo Mitu		
		MEDIO	O R O G E N I A (FASE TARDIHERCINICA)					Erosión	No
		INFERIOR	Grupo Copacabana	Grupo Copacabana	Grupo Copacabana	Permo Carbonifero Marino no Diferenciado	Permo Carbonifero Marino no Diferenciado	Grupo Copacabana	Observado
		PENSILVANIA NO	Hiatus ?	Hiatus ?	Grupo Tarma			Grupo Tarma	?
		MISISIPIANO	Grupo Ambo	Grupo Ambo	Grupo Ambo	No Comprobado	No Comprobado	Grupo Ambo	No Observado
			O R O G E N I A (FASE EOHERCINICA)						
	I N F E R I O R	DEVONICO	Erosion Pre Carbonifera	Grupo Excelsior	Grupo Cabanillas	Devónico no Diferenciado	Erosión Pre Carbonifera	Grupo Cabanillas	ICLA
		SILURICO	Pre Carbonifera	?	?	Silúrico no Diferenciado	Carbonifera		Fm. Vila-Vila Fm. Catavi Fm. Pampa Fm. Zapla
		ORDOVICIENSE	Fm. Pumhuisa	Fm. Contaya	Huacar	Fm. Contaya	Fm. Contaya	Contaya	Fm. San Benito Fm. Anzalde Fm. Limbo
		CAMBRICO	No Observado	No Depositado	No Depositado	No Depositado	No Depositado	No Depositado	
			D I S C O R D A N C I A A N G U L A R						

CUADRO II. TABLA DE CORRELACION DE LAS UNIDADES ESTRATIGRAFICAS DEL MESOZOICO-CENOZOICO DE LA FAJA SUBANDINA-LLANO AMAZONICO DEL ECUADOR, PERU Y BOLIVIA

ERA	SISTEMA SERIE		ECUADOR	FAJA SUBANDINA			LLANO AMAZONICO			BOLIVIA RIOS FLORA - VENI
				MARAÑON	UCAYALI	MADRE DE DIOS	MARAÑON	UCAYALI	MADRE DE DIOS	
	CUATERNARIO	Holoceno Pleistoceno	Fm. Mesa Fm. Rotuno	Aluvial	Reciente Ucayali	Pagorene	No Diferenciado.	Reciente Ucayali	Fm. Madre de Dios	Aluvial
		Neogeno	Fm. Chambira Fm. Arajuno	Grupo Chiriaco	Fm. Ipururo Chambira	Grupo Ipururo	Fm. Ipururo Fm. Pebas Fm. Chambira	Fm. Ipururo Fm. Chambira	Gpo. Ipururo	Fm. Charqui
	TERCIARIO	Paleogeno	Fm. Chalcaná Fm. Tiyuyacu Pastaza Fm. Cuzutca	Fm. Pozo Grupo Huayabamba	Fm. Pozo Casablanca Fm. Yaguarango Fm. Huchpayacu	Grupo Huayabamba	Fm. Pozo Casablanca Yahuarango Huchpayacu	Fm. Pozo Casablanca Yahuarango Huchpayacu	Grupo Huayabamba	Fm. Quendeque
		Superior	Fm. Tena	Cachiyacu Vivian	Fm. Cachiyacu Fm. Vivian	Fm. Vivian	Fm. Cachiyacu Fm. Vivian	Fm. Cachiyacu Fm. Vivian	Fm. Vivian	Fm. Bala
	CRETACEO		Fm. Napo	Fm. Chonta	Fm. Chonta Aguas Calientes Fm. Esperanza	Fm. Chonta Grupo Oriente	Fm. Chonta Aguas Calientes Fm. Esperanza	Fm. Chonta Aguas Calientes Fm. Esperanza	?	Fm. Flora
			Fm. Hollín	Fm. Cushtabata	?	?	Fm. Cushtabata	?	?	Fm. Eslabón
		Inferior		HIATUS	?	HIATUS	?	?	HIATUS	
	JURASICO	Superior	Fm. Chapiza						?	Areniscas Beu ? ? ?
		Medio		Fm. Sarayaquillo						HIATUS ?
		Inferior	Fm. Santiago	Gpo. Pucará		Fm. Ene	Fm. Sarayaquillo		Fm. Ene	
	TRIASICO	Superior	HIATUS	HIATUS	?					
				Gpo. Pucará						

El Grupo Huallabamba se divide en las formaciones Yahuarango, Pozo y Chambira. Marca la regresión de los mares cretáceos, producida en el Terciario inferior, formándose depósitos (Fm. Yahuarango) de ambientes marinos marginales o estuarios y lacustrinos que permitieron la oxidación diagenética de las rocas. La última invasión marina deposita la formación Pozo, que se produce de norte a sur; esta incursión fue breve, los mares se retiran y se depositan sedimentos continentales de las formaciones Chambira, de edad miocénica e Ipururo del Plioceno. A fines del Plioceno se producen los movimientos finales de la orogenia andina (fase Quichuana – Steinmann, 1930) que pliega suavemente los sedimentos existentes. En el Cuaternario se depositan terrazas y coberturas aluviales que sirven de suelo a los bosques actuales.

La Cordillera Subandina ha sido modelada en rocas de edades mesozoicas y cenozoicas que fueron plegados por la orogenia intra-pliocénica (face Quichuana – Steinmann, 1930), que dió lugar a una formación de pliegues relativamente cortos y apretados en zonas cercanas a la Cordillera Oriental; hacia el este la intensidad de estos decrece progresivamente y cambia el estilo tectónico a pliegues de flancos amplios y suaves. La presencia de fallas inversas de alto ángulo completa el cuadro estructural de la zona. Las estructuras presentan una dirección coincidente con la dirección andina, o sea NW-SE.

La evolución de los fenómenos geológicos en el país nos indica que la zona ubicada en la parte oriental de los Andes ha sido tectónicamente la región más estable del país, en comparación con la sierra y costa.

#### 4.1. Cuerpos ígneos

Los cuerpos intrusivos, entre los que predominan los de composición ácida a intermedia, están distribuidos en forma aislada. En la mayoría de los casos tienen dimensiones variables, siendo los mayores los batolitos de San Ramón, Quillabamba y Coasa (Fig. 5).

Gran porcentaje de estos cuerpos se sitúa en el intervalo Precámbrico-Jurásico, y los restantes durante el Terciario. Casi todos ellos se encuentran ubicados al este de la Cordillera Oriental y presentan una fuerte meteorización, por lo que en superficie están bastante descompuestos, siendo la mayor parte de las veces difícil de obtener muestras frescas.

En estudios recientes de los cuerpos intrusivos ubicados en la Cordillera Oriental [4] se mencionan determinaciones de edades por el método de U/Pb en zircón de  $257 \pm 5$  m.a. para el batolito de Quillabamba y  $238 \pm 11$  m.a. para el batolito de Coasa; en otros [5] se realizaron determinaciones de edad por el método Rb-Sr de  $238 \pm 10$  m.a. para el granito de San Ramón; Rocha Campos y Amaral (1971) determinaron edades por K/Ar de  $260 \pm 25$  m.a. para los intrusivos de Huancayo; Stewart y otros (1974) determinaron edades por K-Ar de 251 m.a. para el intrusivo Villa Azul, y Priem y otros (1978) lo hicieron por Rb-Sr en biotita de  $246 \pm 10$  m.a. para el intrusivo de Machupicchu.

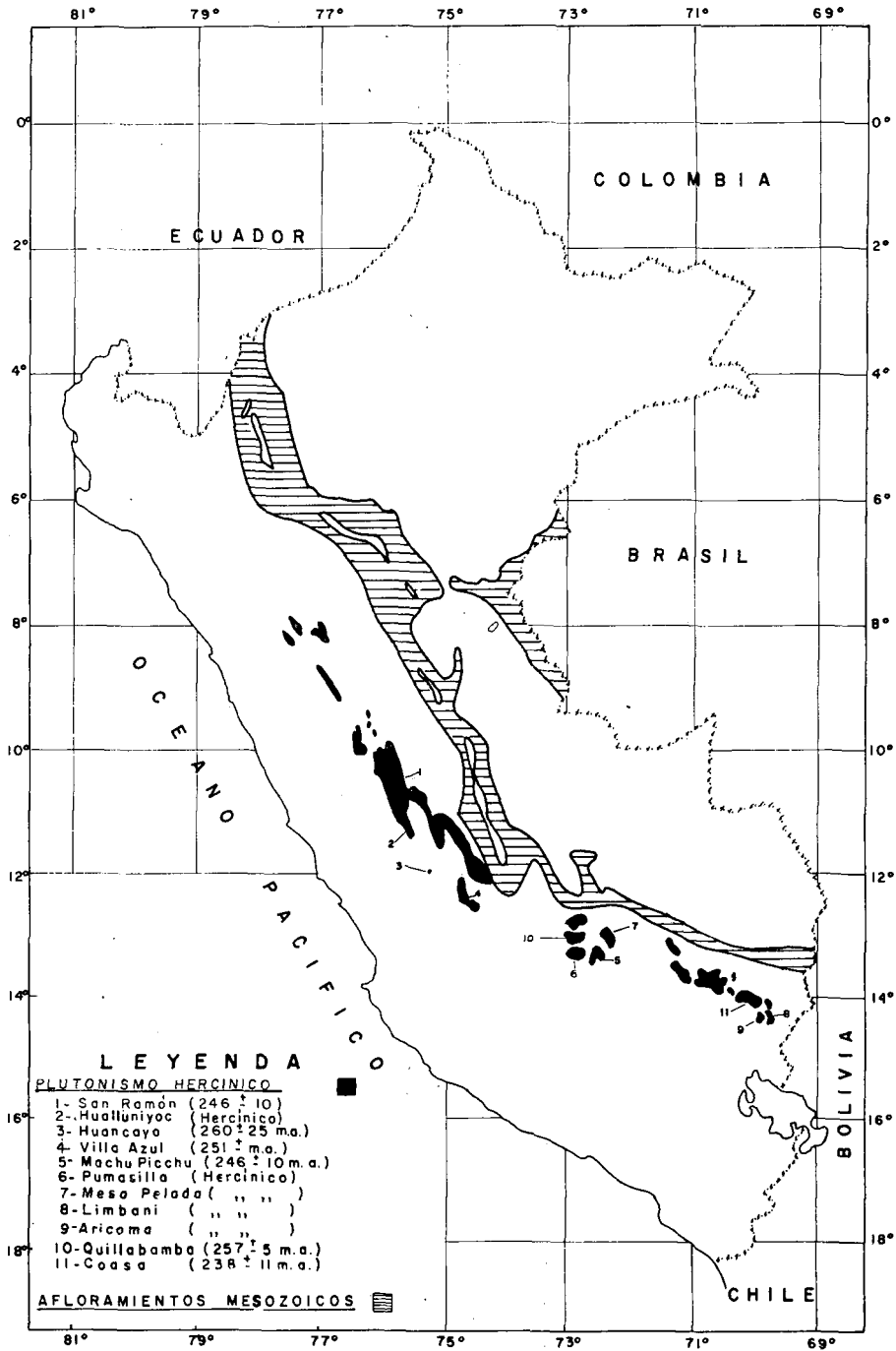


FIG.5. Plutonismo hercínico de la Cordillera Oriental. Afloramiento de rocas mesozoicas — Faja Subandina y Llano Amazónico.

En base a estas edades radiométricas y a la composición química de los cuerpos, los batolitos ubicados en la zona de Vilcabamba y Coasa pertenecen a una misma fase magmática, con características alcalinas [4].

Las rocas volcánicas observadas en el Grupo Mitu presentan una composición similar y corresponderían a la fase extrusiva del magmatismo pérmico superior.

Así mismo, a lo largo de la Cordillera Oriental y al este de ella se ha localizado la presencia de un volcanismo terciario cuya distribución areal se desconoce.

Teniendo en consideración que el magmatismo terrestre postcámbrico, que es más importante y está relacionado con el uranio, se produjo a fines del Pérmico Superior [6], se puede asumir que estos cuerpos ígneos juegan un rol de gran importancia para la localización de yacimientos de uranio en esta zona.

## 5. AMBIENTES FAVORABLES GEOLOGICO-URANIFEROS

Los ambientes favorables se han dividido en sedimentarios, metamórficos e ígneos.

### 5.1. Ambientes sedimentarios

Se han seleccionado la mayoría de las formaciones geológicas de origen continental a deltaico, que presentan condiciones favorables para la yacencia de depósitos uraníferos de tipo epigenético.

#### 5.1.1. Grupo Ambo

El grupo Ambo, tal como se observa en el mapa paleogeográfico (Fig. 6), se encuentra ampliamente distribuido en las márgenes ubicadas hacia la naciente de la Cordillera Oriental; pero en dirección al Llano Amazónico, cuencas del Maraón y Ucayali no se reconoció en las perforaciones realizadas en búsqueda de petróleo. K. Nemuna (1972) menciona la existencia de este piso en la zona de Bacia Do Acre (Brasil), por lo que quedaría como incógnita la no deposición del Misisipiano, o si se depositó y posteriormente fue erosionado. En la cuenca de Madre de Dios se ha manifestado en afloramientos ubicados en el Pongo de Coñec y Alto Manú, con un espesor de  $\pm 500$  m (H. Valdivia, 1973).

Los estudios realizados en su localidad típica [3] señalan la presencia de una sección inferior depositada en ambiente continental y compuesta por un conglomerado basal conformado por clastos de cuarcitas, areniscas a veces micáceas y lutitas intercaladas con delgadas capas de carbón y numerosos restos de plantas (lepidonendropsis, sphenopteris).

La sección media se compone de depósitos de ambientes marinos constituidos por bancos potentes de areniscas gris oscuras con intercalaciones de lutitas negras, ricas en fósiles marinos como brachiopodos (syringothyris, alispirifer).

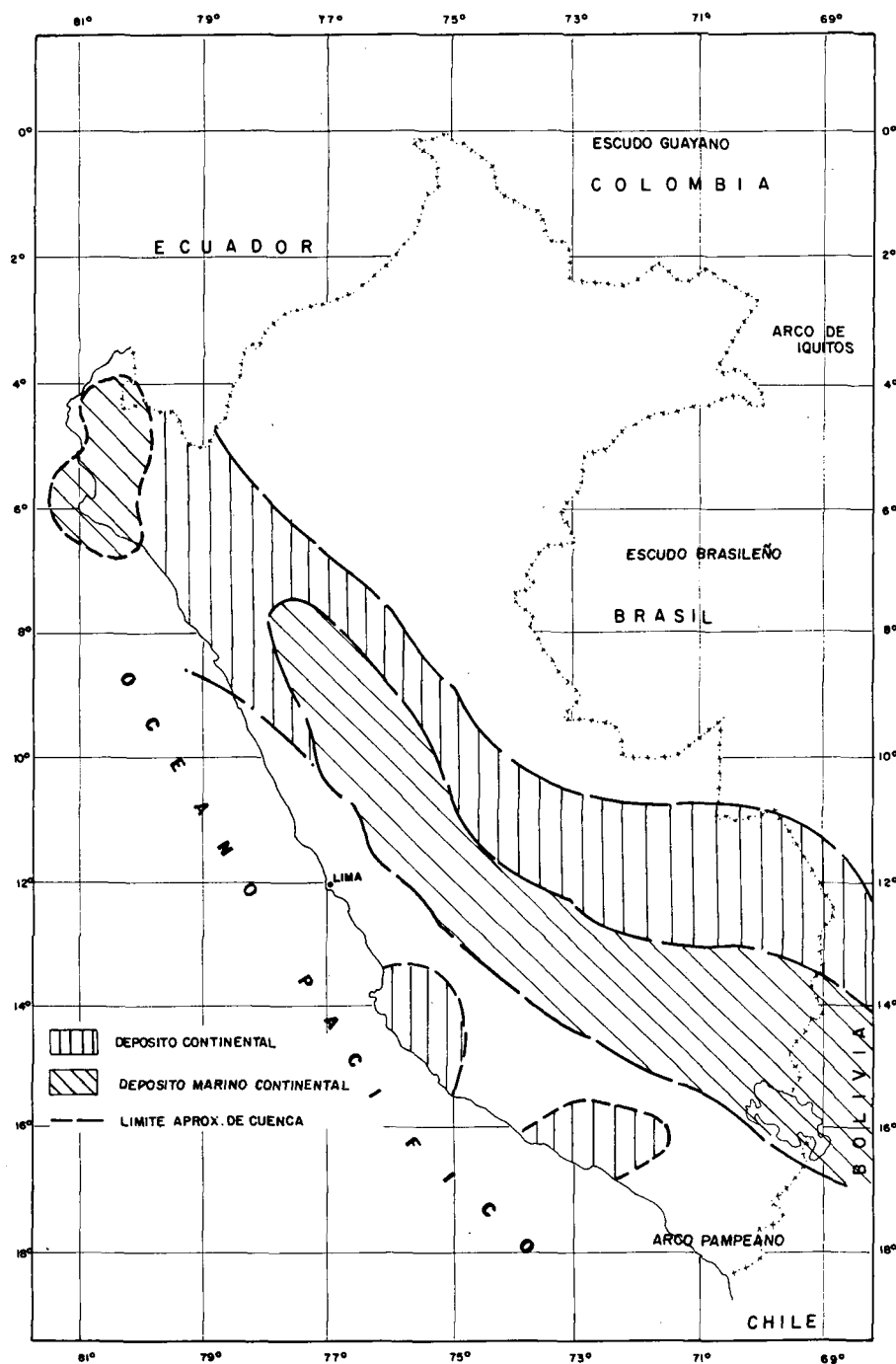


FIG.6. Mapa paleogeográfico del Miásipiano (Grupo Ambo).

La sección superior la componen depósitos de ambiente continental con lutitas carbonosas y areniscas que contienen restos de plantas, elementos piroclásticos y lavas andesíticas.

Los fósiles encontrados en los niveles continentales y marinos indican una edad misisipiana. En términos generales, este grupo descansa con suave discordancia, algunas veces poco perceptible, sobre el Paleozoico Inferior.

### 5.1.2. Grupo Mitu

Su distribución paleogeográfica (Fig. 7) se presenta en la Faja Subandina y, en forma restringida, en la subcuenca del Marañón. Es de ambiente deposicional continental, con breves incursiones marinas en la parte superior de la columna [7, 8], habiéndose encontrado en ellas restos de brachiopodos en las localidades de Huánuco, San Ramón, Tarma, Vilcabamba y Cordillera Oriental de Puno.

Litológicamente está compuesto por dos miembros con las siguientes características:

- Sección inferior, constituida por areniscas arcósicas, lutitas y conglomerados, que se encuentran afectados en la zona de la Cordillera Oriental por cuerpos intrusivos de edad paleozoica superior.
- Sección superior, en el sector de la Cordillera Oriental, que se presenta compuesta por lavas y piroclásticos de composición riolítica o andesítica y colores rojizos que descansan sobre los cuerpos ígneos hercínicos [9]. Estos volcánicos son de composición química alcalina [8, 9] y pertenecen a la fase efusiva del magmatismo hercínico.

Hacia el oeste la influencia volcánica se atenúa volviéndose predominantemente sedimentaria.

Aunque este Grupo no ha sido estudiado en su aspecto sedimentológico, se ha encontrado en él sedimentación rítmica, estratificación cruzada y presencia de paleocanales.

La base del Grupo descansa sobre una superficie de erosión que trunca las rocas del grupo Copacabana o formaciones más antiguas. El límite superior es una discordancia suave con rocas del mesozoico.

En los niveles marinos de Mitu, Fricker [8] encontró el braquiépodo *marginifera capaci d'Orbigny* de edad pérmica. El límite inferior está determinado por las calizas Copacabana del Leonardiano Inferior [9], pero el límite superior es difícil de precisar. Por esta razón se le ha considerado de una edad que va del Permiano medio al Triásico [9].

En la secuencia volcánica, R. Rogovich (1977) observó en la zona de Macusani (Puno) elevaciones radiométricas de 5 a 7 veces las cuentas de fondo; el muestreo realizado por W. Herrera (1978) en la misma zona dió valores de 5,6 a 13,2 ppm de U. Estos valores anómalos indican que esta zona volcánica

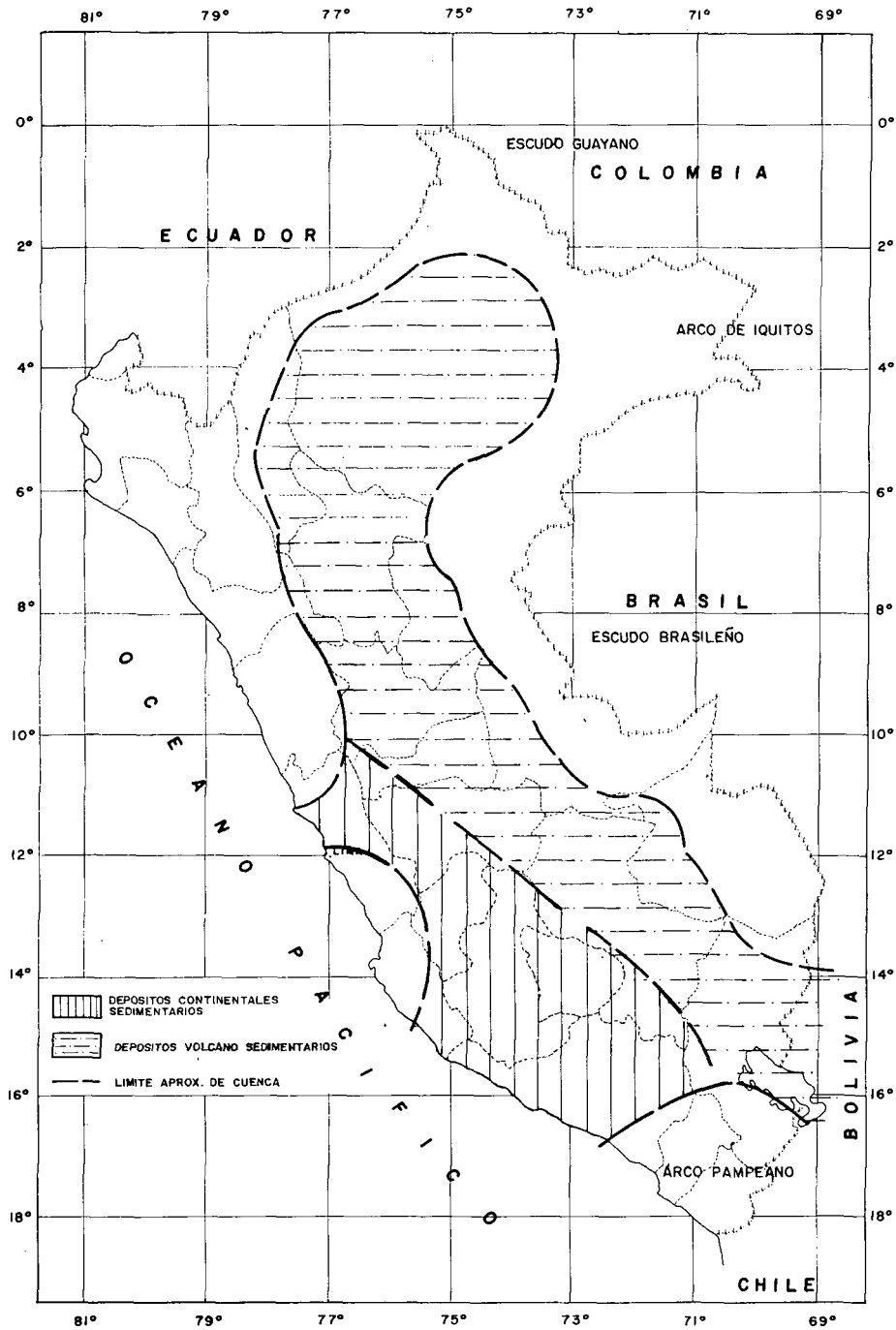


FIG.7. Mapa paleogeográfico del Pérmico medio Superior (Grupo Mitu).

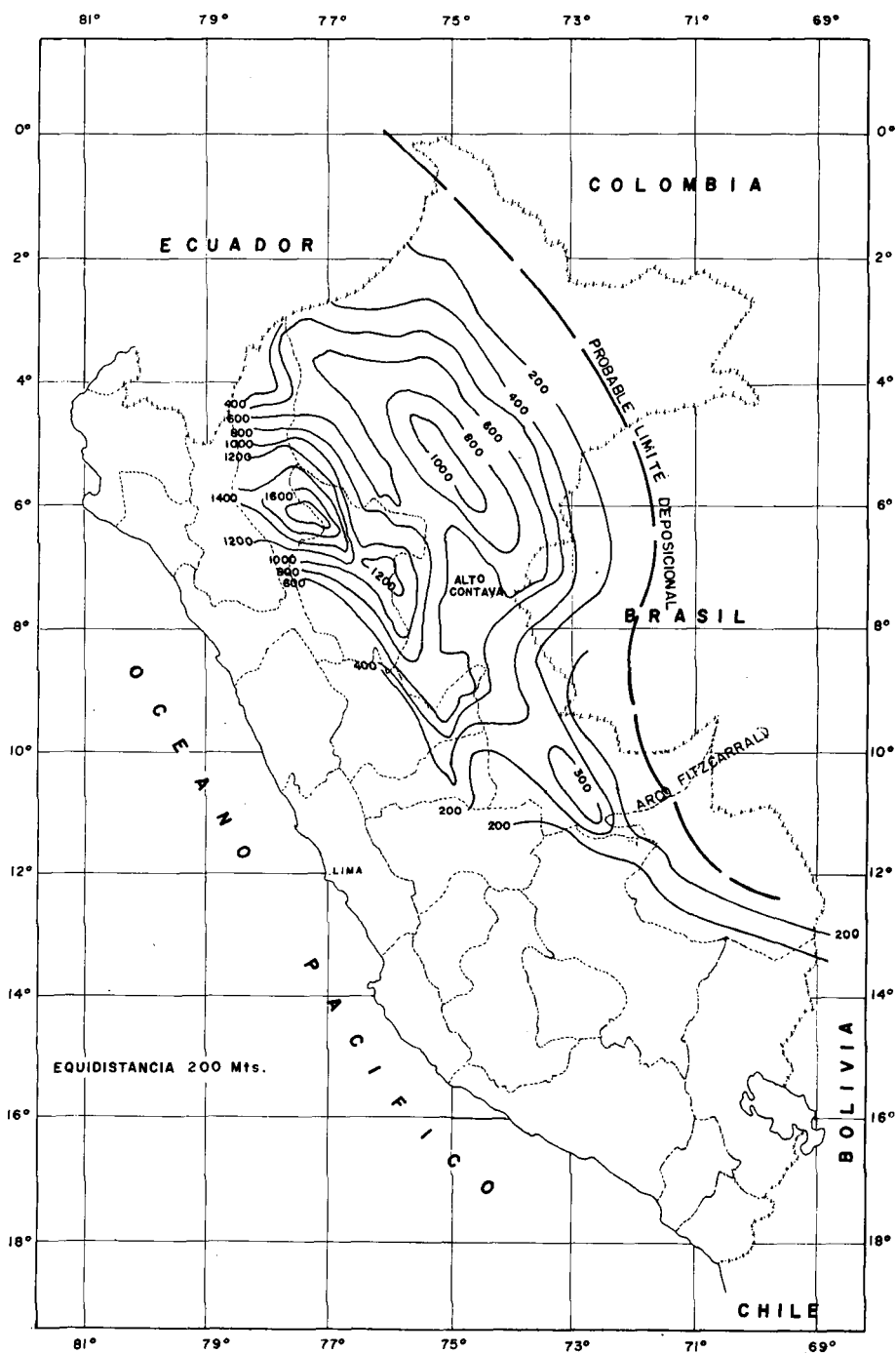


FIG.8. Mapa isopáquico del Grupo Oriente.

contiene uranio, por lo que es aconsejable su comprobación regional mediante trabajos de campo más detallados. Pero como factor negativo está el persistente color rojo de esta secuencia, lo que indica un ambiente oxidante activo.

### 5.1.3. Grupo Oriente

Tiene una amplia distribución y propagación en la zona de estudio (Fig. 8), y presenta ambientes mixtos de depositación. La base y parte superior es de ambiente deposicional continental (Fms. Cushabatay y Aguas Calientes), mientras que la sección media es de ambiente marino (formación Esperanza).

#### 5.1.3.1. Formación Cushabatay

Constituye la parte inferior del Grupo Oriente, y muestra amplia distribución y buen desarrollo en la Faja Subandina y Llano Amazónico (Fig. 9).

Esta formación se caracteriza por su ambiente de sedimentación fluviodeltaico, con aportes procedentes de la erosión de los escudos. La presencia de gran cantidad de restos de troncos en ciertos niveles inferiores de la formación indica que contemporáneamente a su deposición existieron bosques, en la actual posición de la Cordillera Oriental.

Esta formación presenta en grandes áreas una litología homogénea, compuesta por areniscas cuarzosas blancas, con estratificación cruzada, torrencial y en bancos masivos con presencia de canalizaciones producidas por avenidas de corrientes de agua o ríos; por lo general, estas canalizaciones muestran niveles de mayor permeabilidad.

En muchos lugares las areniscas se intercalan con lutitas limosas micáceas, con restos de vegetales y horizontes carbonosos. El espesor de la formación es bastante uniforme, aunque manifiesta adelgazamiento hacia el este.

Su límite inferior es ligeramente discordante sobre la formación Sarayaquillo y formaciones más antiguas, en tanto que su límite superior pasa transicionalmente a la formación Esperanza.

Desde el punto de vista de la prospección, presenta características geológicas favorables (capas permeables limitadas por horizontes confinantes, estratificación cruzada, presencia de canalizaciones y ambientes reductores dados por la presencia de troncos, plantas y materia orgánica diseminada, por lo general en proceso de carbonización). En muchos lugares se han observado zonas reductoras y zonas oxidadas.

Las cuentas de fondo registradas en la formación fueron de 50 a 75 c/s en la zona de San Ramón-Oxapampa y de 50 a 75 c/s para la zona de Moyobamba-Campanilla. En los alrededores de Sogorno se observaron valores de 4 a 5 veces las cuentas de fondo.

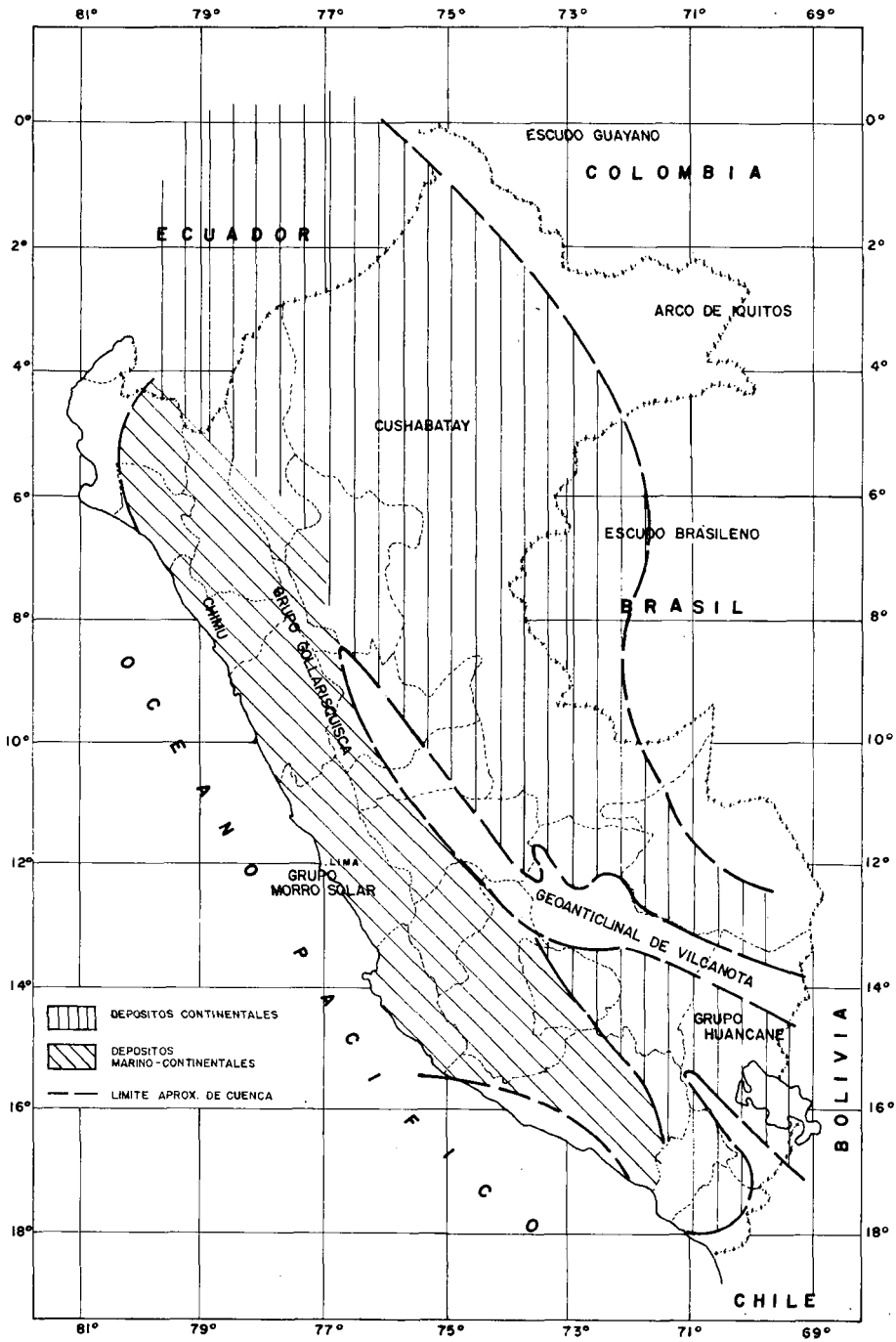


FIG.9. Mapa paleogeográfico del Cretáceo Inferior.

### 5.1.3.2. Formación Aguas Calientes

Presenta amplia distribución en la Faja Subandina y Llano Amazónico (Fig. 10). Hacia el sur disminuye su espesor, desapareciendo en la subcuenca de Madre de Dios. Representa una variación lateral de facies en sentido norte — sur de la formación Chonta.

Su ambiente deposicional varía de marino en el norte a fluvio-deltaico hacia la zona del Ucayali.

Litológicamente está compuesta por areniscas cuarzosas de color blanco, grano medio a grueso, conglomerádicas, de estratificación masiva algunas veces cruzada y con presencia de canalizaciones e intercalaciones de lutitas negras carbonosas con restos de plantas.

Las estructuras sedimentarias y las características sedimentológicas indican ambiente deposicional fluvial con corrientes torrenciales, en sus bordes occidental (Cordillera Oriental) y oriental. La fuente de aporte de estos sedimentos fueron los elementos producidos por la erosión de rocas metamórficas del Escudo del Brasil y Cordillera Oriental.

En el campo se han observado cuentas de fondo de 50 a 75 c/s en la zona central, que se hacen 3 ó 4 veces mayores entre Tarapoto y Chazuta, señalando enriquecimientos singenéticos.

### 5.1.4. Terciario

Rocas de esta edad están expuestas en la mayor parte de la Faja Subandina y Llano Amazónico, distribuidas en una serie de subcuencas (Fig. 4) que presentan diferentes desarrollos tal como se observa en las isópacas del Terciario (Fig. 11). En la subcuenca del Ucayali se han registrado valores anómalos en la zona del río Abujao, cerca a los límites orientales de dicha subcuenca.

La sedimentación de edad terciaria es predominantemente de origen continental, a excepción de la formación Pozo que es de ambiente marino.

A continuación se describen las formaciones que presentan mayor favorabilidad geológico-uranífera.

#### 5.1.4.1. Formación Casablanca

De limitada distribución en la sección oriental del Perú, se pierde progresivamente hacia el sur a partir del Ucayali inferior. Es de ambiente deposicional continental, y litológicamente está compuesta por areniscas cuarzosas de color blanco, masivas; por su litología uniforme sirve de horizonte guía en la parte septentrional del oriente peruano.

Las escasas medidas radiométricas dan una cuenta de fondo de 50 a 70 c/s en la zona de Tarapoto, en un área de ambiente deposicional bastante aparente para la formación de yacimientos uraníferos sedimentarios.

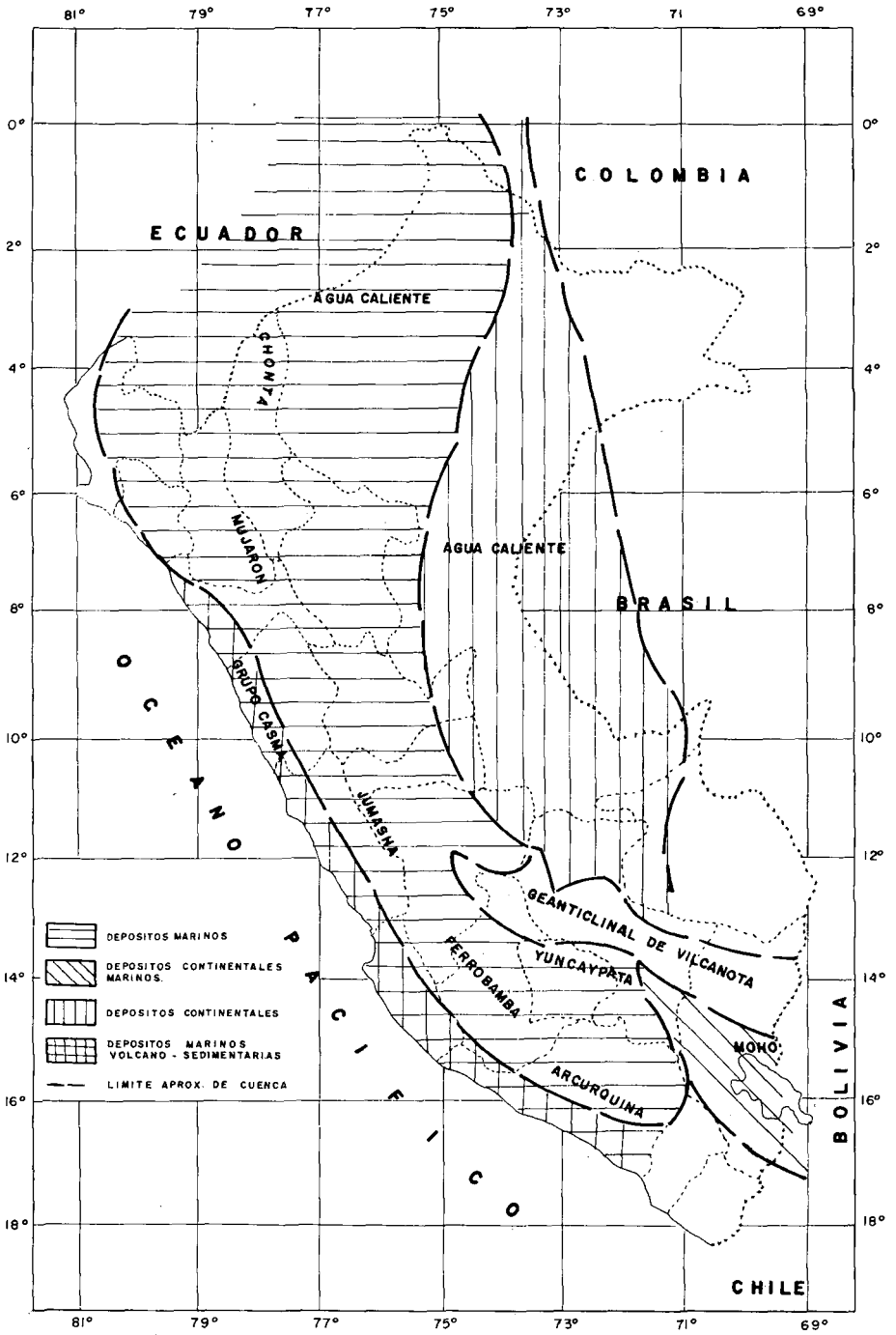


FIG.10. Mapa paleogeográfico del Cenomaniense.

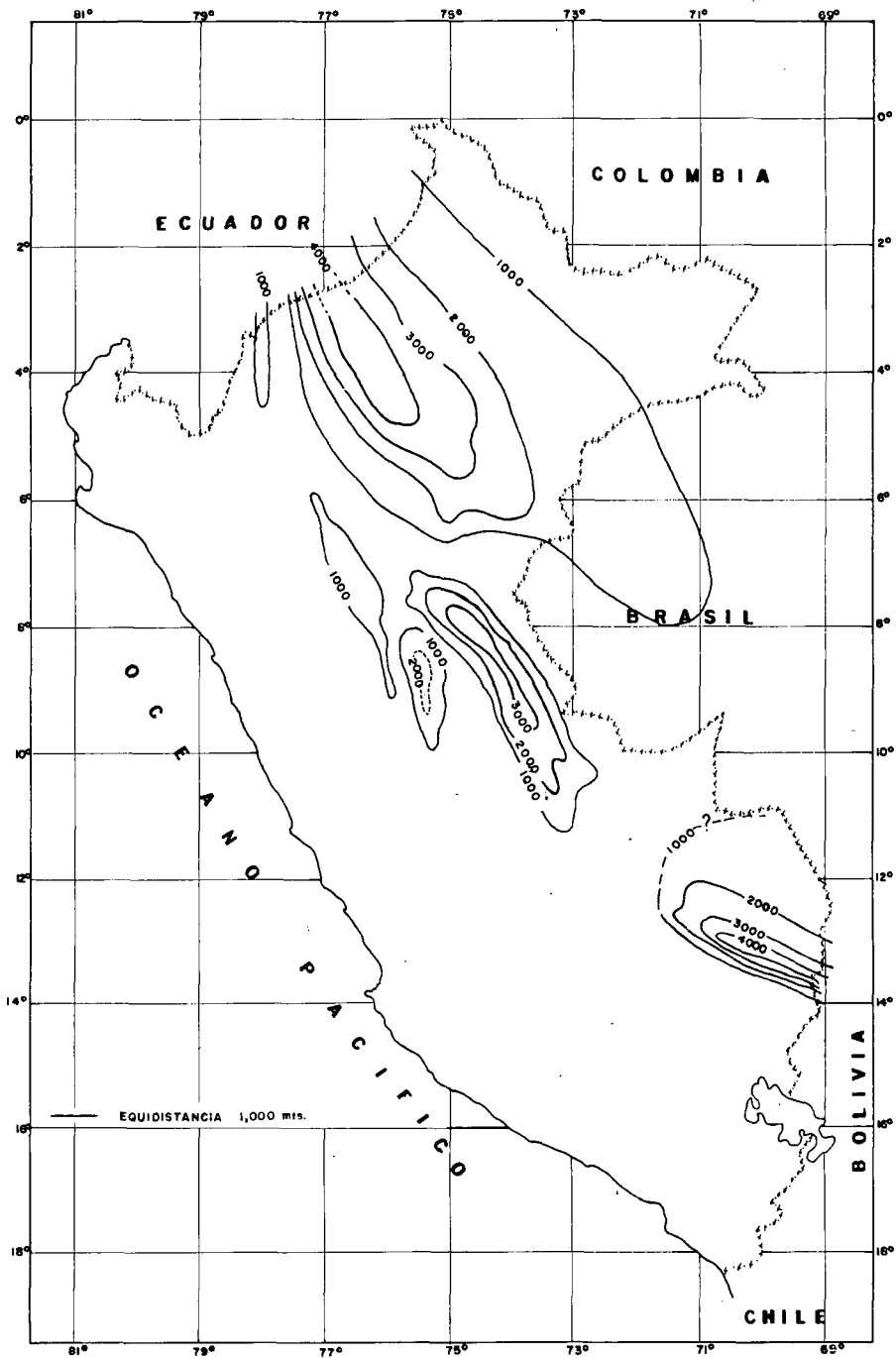


FIG.11. Isópacas del Terciario.

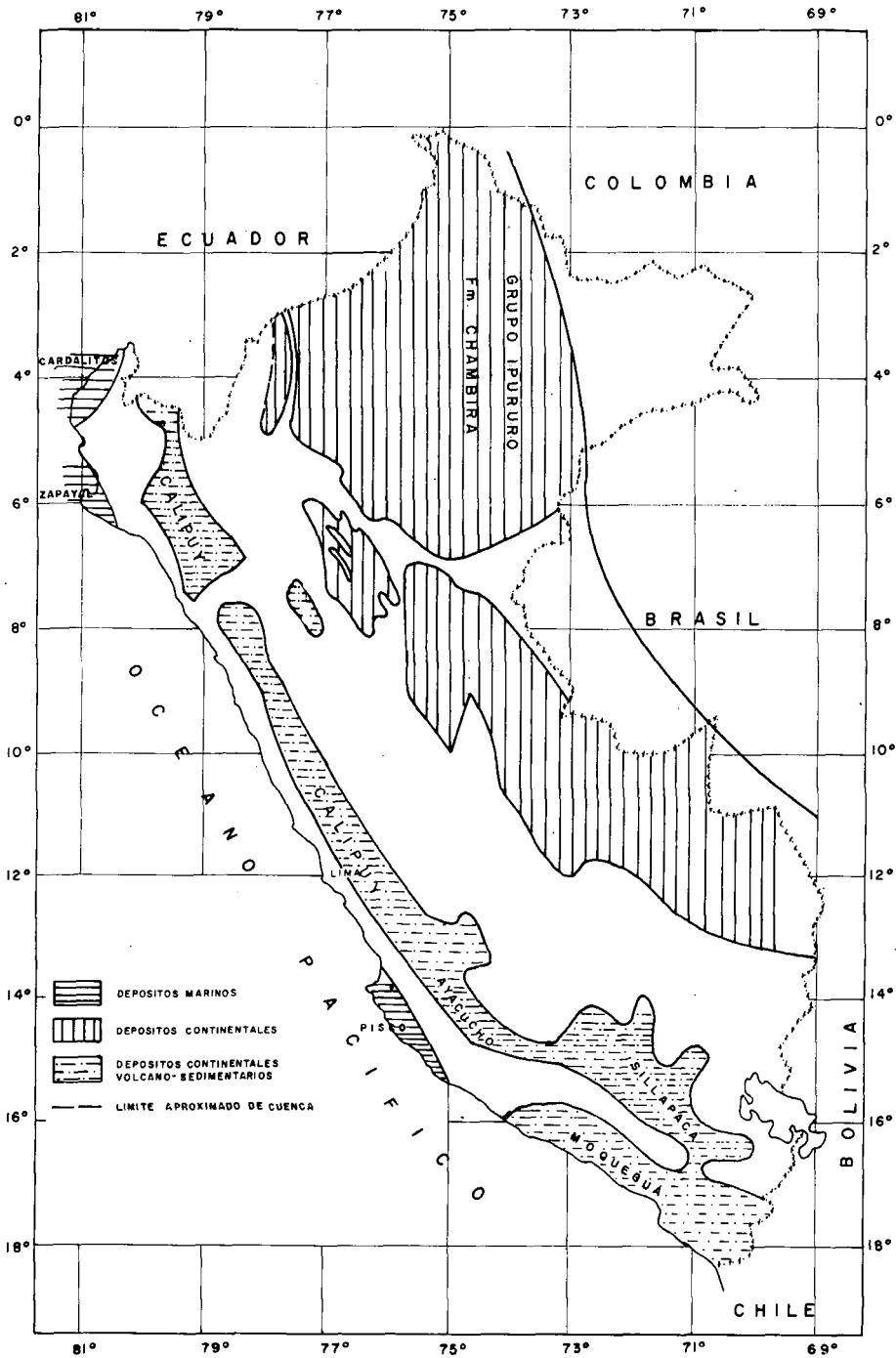


FIG.12. Mapa paleogeográfico del Mioceno.

#### 5.1.4.2. Formación Chambira

De ambiente deposicional continental, tiene amplia distribución en la Cordillera Subandina y Llano Amazónico (Fig. 12). Litológicamente está compuesta, en la sección del río Cachiyacu, por arcillas, margas y lodolitas rojas y marrones con intercalaciones de areniscas grises y tobas masivas nodulares gris claras y verdosas. En el río Cushabatay está constituida por lutitas limosas de color rojo, intercaladas con areniscas de grano fino que muestran estratificación cruzada; la secuencia presenta una rápida variación lateral de facies y tiene poca a ninguna selección de su textura, lo que nos indica variaciones de alta y baja energía deposicional. El tamaño de los granos varía de grano muy grueso al oeste (cerca de la Cordillera Oriental) a grano fino al este (frontera con Brasil). Su estratificación no es uniforme; así, especialmente en la Faja Subandina, es cruzada, oblícuca, con canalizaciones y acumulaciones lenticulares.

En el campo se han observado condiciones geológicas favorables pero, lamentablemente, los valores radiométricos son bajos (de 30 a 50 c/s de cuenta de fondo), y la coloración es roja persistente con ausencia en gran parte de material carbonoso, lo que sugiere que prevalecieron condiciones de ambiente altamente oxidante.

En la zona de Tarapoto a lo largo del río Mayo, esta formación presenta características similares a la formación Morrison del sur del Estado de Utah (Estados Unidos). Muestras de aguas provenientes del grupo Huayabamba han dado valores ligeramente anómalos. En el río Inambari se han observado restos de brea pero con radiometría baja.

#### 5.1.4.3. Formación Ipururo

De amplia distribución en la Faja Subandina y Llano Amazónico (Figs 13, 14). Litológicamente compuesta por conglomerados, areniscas grises, limolitas, lodolitas, arcillitas y lutitas, que presentan constantes variaciones de facies, en los que alternan niveles de suave y fuerte energía representados por estructuras como rellenos de canalizaciones, estratificación cruzada; así mismo se observa la presencia de troncos, plantas y restos orgánicos carbonizados.

Los colores característicos son amarillos opacos a grises claros, siendo el ambiente deposicional de tipo continental.

En la zona del río Abujao y Quebrada de Bucunya, en areniscas tobáceas y conglomerados pertenecientes a esta formación, se han encontrado gran cantidad de troncos fósiles y restos carbonosos que presentan enriquecimientos uraníferos; en estos restos orgánicos se han observado elevaciones de la radiometría de 6 a 7 veces las cuentas de fondo. En el perfil geológico-radiométrico (Fig. 15) se puede ver la ubicación de los afloramientos.

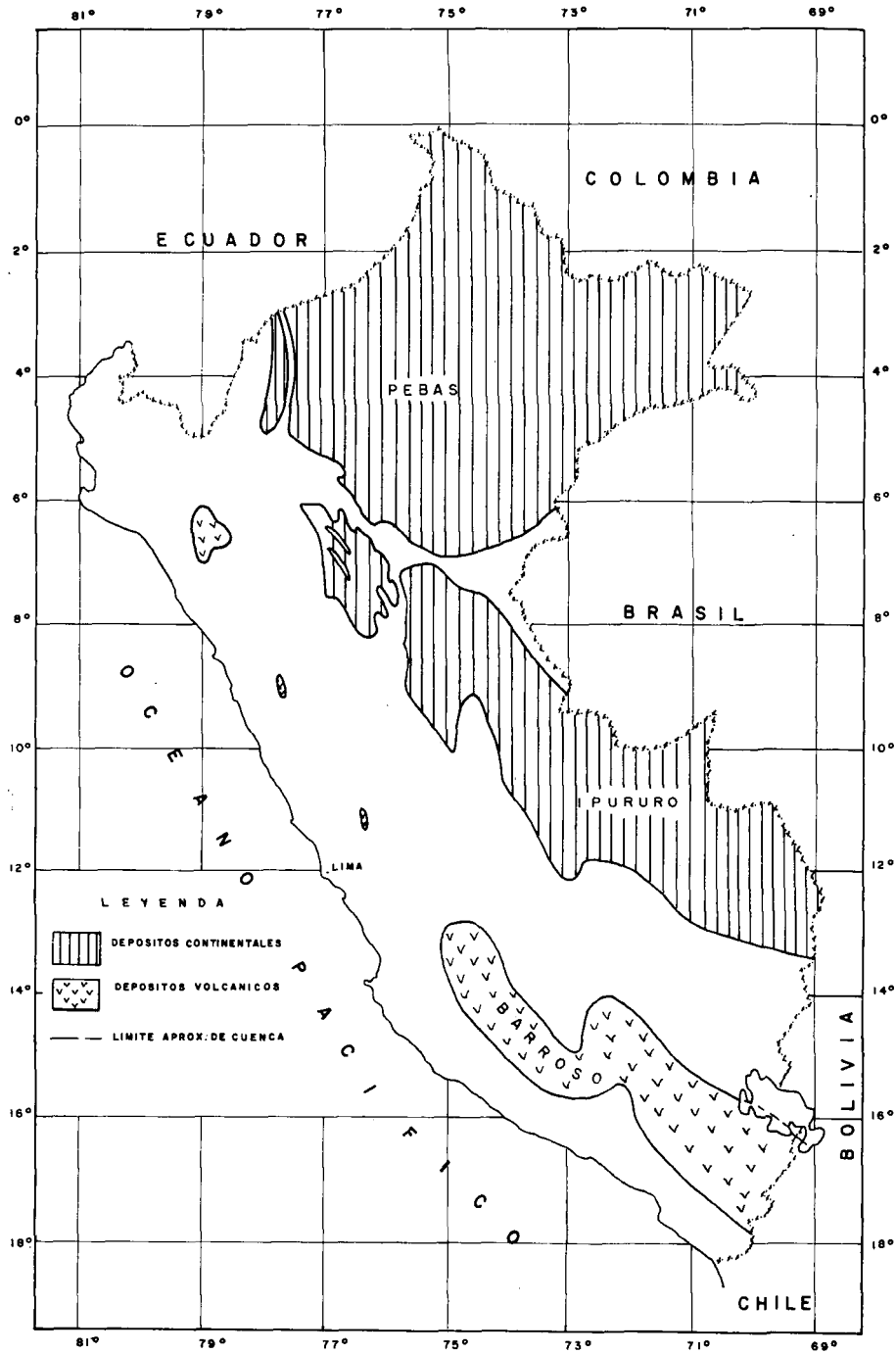


FIG.13. Mapa paleogeográfico del Plioceno-Pleistoceno.

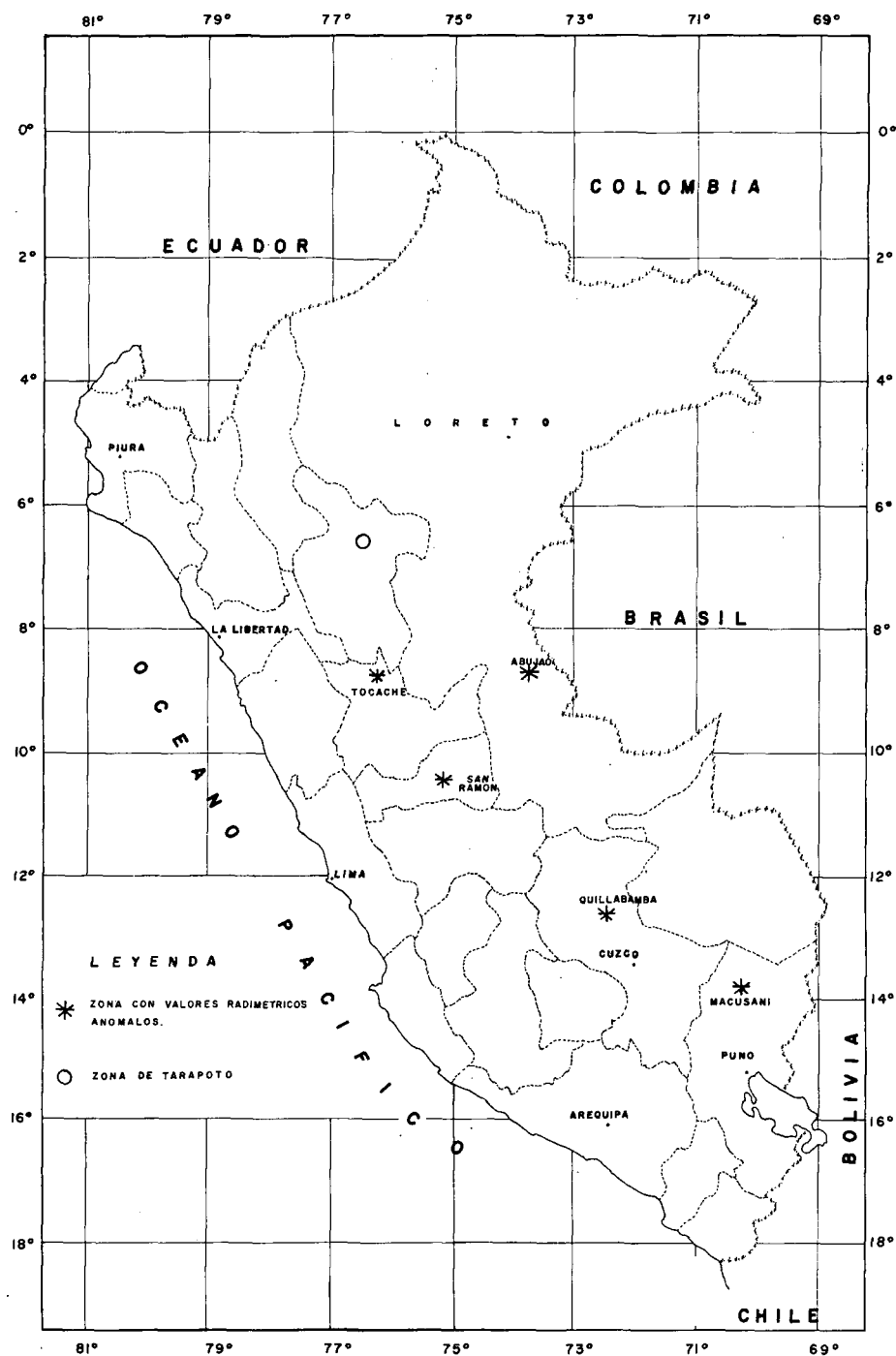


FIG.14. Valores radiométricos anómalos y zonas geológicas favorables sin radiometría anómala.

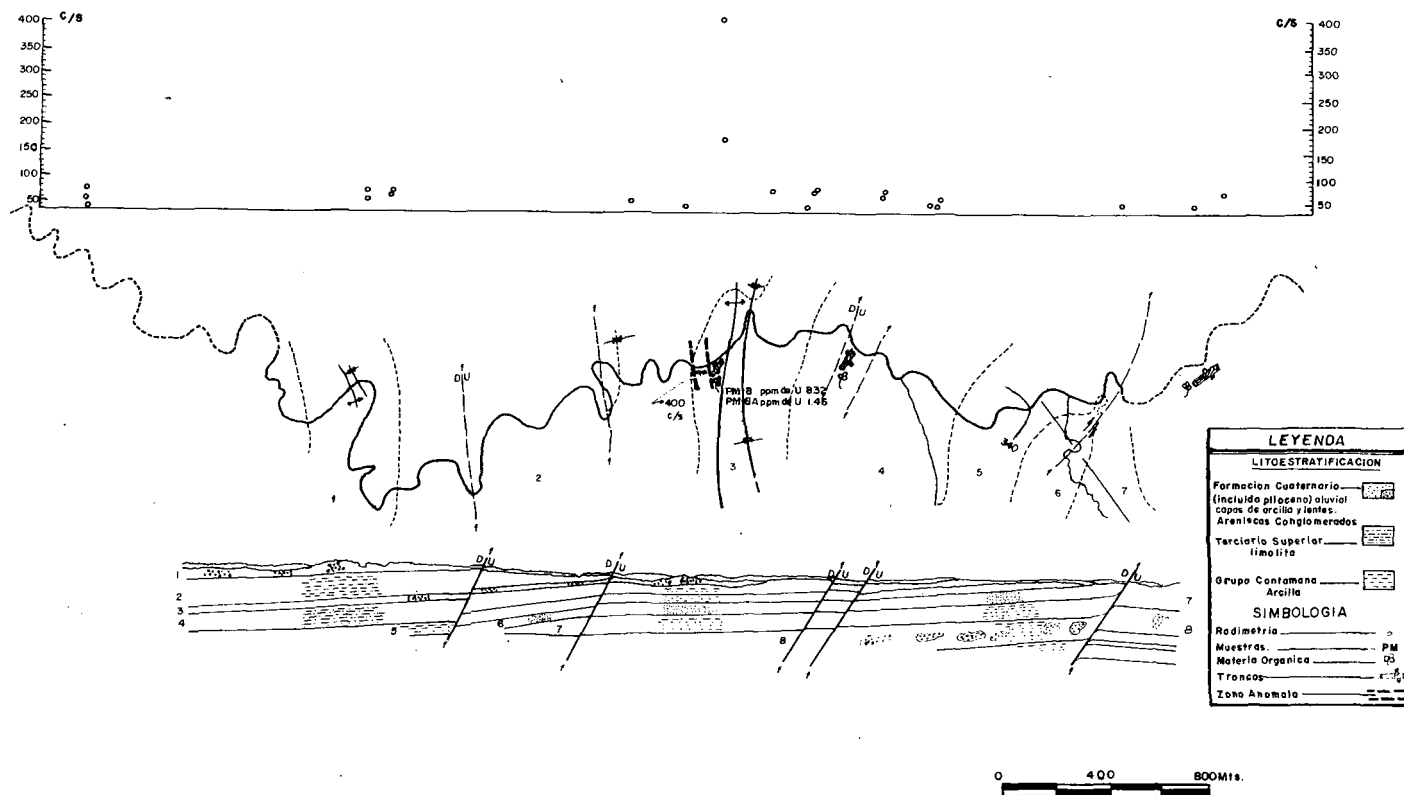


FIG.15. Perfil geológico radiométrico (zona del río Abujao).

Postulamos que las areniscas son el producto de la erosión de rocas volcánicas terciarias ubicadas en la Cordillera Oriental, siendo probable que esta formación continúe hacia el sur, en dirección a la subcuenca de Madre de Dios con similares condiciones.

## 5.2. Ambientes metamórficos

Se han observado rocas del Precámbrico en el tramo de carretera Huánuco — Tingo María, entre Puente Roncho y Puente Durand que se componen de gneises bandeados, mica-esquistos con un bandeamiento de niveles claros y negros y un grado de metamorfismo que se ubica en la mesozona media, y que se intercalan con *anfíbolitas*, las cuales dan por alteración una coloración blanca lechosa, a veces verde clara; así mismo se encuentran esquistos negros finos con sericita y clorita de bajo grado de metamorfismo. Hacia la parte oriental se observan peridotitas y piroxenitas cortadas por un granito a biotita.

Estas rocas presentan una cuenta de fondo de 40 a 70 c/s SPP-2. En la zona del Abra del Carpish se observó un alza en las medidas radiométricas habiéndose medido hasta 180 c/s en roca no alterada y 350 c/s en roca alterada.

J. Gabelman y R. Beard [10] sugieren que por la ubicación geográfica del área, encuadrada en zona de mineralización de muy baja temperatura, está probablemente asociada a posibles yacimientos de uranio de origen hidrotermal de cierta importancia, razón por la que constituye una zona a prospectar.

## 5.3. Ambientes ígneos

Los cuerpos ígneos de mayor importancia se encuentran ubicados en la Cordillera Oriental (Figs 5, 14). Se consideran elementos favorables en la prospección de uranio los cuerpos del Paleozoico Superior que forman parte de una extensa provincia magmática.

A continuación se describirán los cuerpos intrusivos del Paleozoico Superior (Pérmico Superior) de mayor importancia:

### 5.3.1. El batolito de San Ramón

Se ubica en la Cordillera Oriental (Perú Central) (Fig. 14) y comprende una extensión de aproximadamente 100 km de largo (norte-sur) y un ancho de 10 a 30 km. Presenta colores rojos y gris y es de grano grueso con cristales bien desarrollados.

Mediciones de edades radiométricas [5] por el método de Rb/Sr dan una edad de  $238 \pm 10$  m.a., o sea del Pérmico Superior a Triásico Inferior, y lo asocian al volcanismo presente en la formación Mitu.

Las mediciones radiométricas realizadas en este cuerpo son uniformes. Los valores más elevados son 4 a 5 veces las cuentas de fondo en sus facies rojas, mientras que en las facies grises representan 2 a  $2\frac{1}{2}$  veces las cuentas de fondo.

En la localidad de San Alberto se han detectado valores radiométricos anómalos, que podrían ser una manifestación hidrotermal de este cuerpo ígneo.

En el borde del granito de San Ramón se aprecia una faja sedimentaria compuesta por formaciones rocosas, mesozoicas y terciarias. El grupo oriente (Cretácico Inferior) y los depósitos terciarios son las formaciones que presentan mejores condiciones geológico-uraníferas, así como ciertos valores anómalos.

### 5.3.2. *Cuerpos intrusivos de la zona de Vilcabamba*

La zona de Vilcabamba se ubica en el sector sur de la Cordillera Oriental, Dpto. del Cuzco (Figs 5, 14). En ella se ha descubierto una serie de cuerpos intrusivos que presentan una longitud de 50 km y un ancho aproximado de 30 km, con dirección este — oeste, paralela a las estructuras andinas de la deflexión de Abancay.

Existe una cierta homogeneidad en su composición mineralógica y química [9], presentando grano grueso a porfirítico.

Por análisis químicos se ha determinado la composición alcalina de estos cuerpos [8, 9] y en determinaciones por U/Pb en zircón se han obtenido resultados del orden de 1200 a 1300 ppm de uranio [4].

Geólogos de la Junta de Control de Energía Atómica del Perú (1968–1969) mencionan haber obtenido mediciones radiométricas de 4 a 5 veces las cuentas de fondo.

### 5.3.3. *Cuerpos intrusivos de la zona de Coasa-Macusani*

La zona Coasa-Macusani se ubica en la sección sur de la Cordillera Oriental, Dpto. de Puno (Figs 5, 14). Los cuerpos intrusivos de este área se presentan alineados según una orientación noroeste sureste, en una extensión aproximada de 100 km de larga y 25 km de ancha. La mayor parte de estos cuerpos intruyen los esquistos pertenecientes al Paleozoico Inferior y calizas del Paleozoico Superior.

Los intrusivos de esta zona presentan una similitud de composición petrográfica [4] y química. Están compuestos por granitos porfiríticos de colores grises, con cristales de cuarzo, feldespato potásicos, plagioclasas, biotita (frecuentemente cloritizada), zircón y apatita. Laubacher (1978) menciona que estos cuerpos pertenecen al mismo evento magmático.

Se mencionan edades [4] de  $238 \pm 11$  m.a. para el batolito de Coasa, obtenidas por el método U/Pb en zircón, así como un contenido de uranio del orden de 2600 a 2800 ppm (en zircón). W. Herrera (1978), en un muestreo realizado, menciona valores de 6 a 8 ppm de uranio.

La composición de estos cuerpos intrusivos es similar a la de los volcánicos félsicos del Pérmico Superior, de donde se deduce que estos últimos representan la fase efusiva del magmatismo producido a fines del Paleozoico Superior y Triásico Inferior.

Así mismo, en la zona se han observado ignimbritas que se les ha denominado formación Quenamari-Macusani de edad pliocénica, con 4,42 m.a. (Barnes y otros, 1971). Estas rocas se distribuyen en los bordes de los cuerpos intrusivos, formando delgadas coberturas.

R. Rogovich (1977) y W. Herrera (1978) mencionan valores radiométricos para las rocas antes mencionadas de 10 a 7 veces las cuentas de fondo. El muestreo realizado en esta zona arroja valores de 80 a 200 ppm de uranio.

Las condiciones geológicas e hidrotermales ubicadas a lo largo de la Cordillera Oriental y pendiente este de los Andes peruanos y muestran gran similitud con las pendientes orientales de los Andes en su sección sur (zona de Argentina), donde se observa la existencia de yacimientos de uranio; solamente la presencia de la Selva y Ceja de Selva en el sector del Perú-Bolivia diferencian a ésta de la porción sur, que tiene clima árido a semi-árido.

## REFERENCIAS

- [1] DAVILA, J.J., PONCE DE LEON, V., La sección del río Inambari en la Faja Sub-andina del Perú y la presencia de sedimentos de la Formación Cancañiri (Zapla) del Silúrico, *Rev. Tec. Yac. Pet. Fisc.*, Bol. 1 (1971).
- [2] PARDO, A., ZUÑIGA Y RIVERO, F., Estratigrafía y Evolución Tectónica del Paleozoico de la Región de la Selva del Perú, II Congreso Latinoamericano de Geología, Caracas (1973).
- [3] DALMAYRAC, B., Estudio Geológico Preliminar de la Cordillera Oriental (Estudio geológico del bloque A., Dptos. Pasco y Huánuco), *Serv. Geol. Min.*, Lima (1973).
- [4] LANCELOT, J., LAUBACHER, G., MAROCCO, R., RENAUD, U., U/Pb radiochronology of two granitic plutons from the eastern cordillera (Peru). Extent of Permian magmatic activity and consequences, *Geol. Rundsch.* 67 (1978).
- [5] CAPDEVILLA, R., et al., Le batholite de San Ramón (Cordillère Orientale du Pérou Central). Un granite tardihercynien mis en place à la limite permien-trias. Données géologiques et radiométriques, *Geol. Rundsch.* 66 (1977) 2434.
- [6] DAHLKAMP, F.J., "Geochronological-metallogenetic correlation of uranium mineralization", Recognition and Evaluation of Uraniferous Areas (Proc. Tech. Comm. Meeting Vienna, 1975), OIEA, Viena (1977) 131.
- [7] NEWELL, N.D., Geology of the Lake Titicaca region, Peru and Bolivia, *Geol. Soc. Am. Mem.* 36 (1949).
- [8] FRICKER, P., WEIBEL, M., Zur Kenntnis der eruptiven Gesteine in der Cordillera Vilcabamba (Peru), *Schweiz. Mineral. Petrog. Mitt.* (1960) 40.
- [9] MAROCCO, R., Estudio geológico de la Cordillera de Vilcabamba, *Serv. Geol. Min. Perú.*, Bol. 4 (Serie D: Estudios Especiales) (1978).
- [10] GABELMAN, J., BEARD, R., Uranio en el Perú, *JCEA* 11 56 (1966).

## DISCUSSION

V. VIRREIRA: What is your opinion about the source of the Tertiary sediments of the sub-Andean zone?

L. CANEPA: The Tertiary sediments of the Amazon plain are mainly the result of the erosion of rocks from the eastern Cordillera. It is believed that the Brazilian Shield has also supplied material, but as a secondary source.

L.E. PEREZ: You mentioned a Tertiary series made up of sandstones, muds and tuffs. Could you say something about the uranium content of the tuffs and about their degree of weathering?

L. CANEPA: The tuffs show an activity some 5–6 times higher than the background measured with the SPP-2 hand scintillometer. It is not known whether there are anomalies in neighbouring zones since not much verification work has been done in Peru. With regard to the weathering, a region of oxidation has been observed to the west of the anomalous zone, which itself is probably in the reduction zone.

P.D. TOENS: What age are the anomalous tuffs of the Amazon region?

L. CANEPA: The tuffs which gave anomalous values in the Almgao zone are Upper Tertiary, more specifically Upper Miocene-Pliocene.

B. MORALES: Could you explain the importance of the manifestation of uranium in the San Alberto ravine in Oxcaepampa (which has been known since the first exploration work in the eastern Cordillera) for future uranium prospecting in the Palaeozoic schists with granulitic bodies?

L. CANEPA: No studies have been made on this subject but it seems that the granite or batholite of San Ramón has an effect on the surrounding anomalies.

# MANIFESTACIONES URANIFERAS CONOCIDAS EN COLOMBIA

H. RODRIGUEZ, J.A. ALUJA, J. PFEIFFER,  
L.A. CORTES

División de Materias Primas,  
Instituto de Asuntos Nucleares,  
Bogotá,  
Colombia

## Abstract-Resumen

### KNOWN URANIFEROUS OCCURRENCES IN COLOMBIA.

On the basis of an internal report entitled 'Possibilities of Uranium in Colombia' compiled by the author in 1973, and as a result of work done by the foreign companies TOTAL-MINATOME (France) and ENUSA (Spain) using airborne radiometric techniques, ground surveys (plus occasional aerial prospecting) and geochemical methods (sediments and waters), approximately 260 uranium anomalies (in 1973 the figure was 106) have been discovered after covering 30% of the areas considered under priorities I, II and III (321 000 km<sup>2</sup>), together with 16 000 km of the national road network ( $\pm$  44 000 km). In addition to supporting the original selection, these results indicate considerable variation in the geological conditions and metallogenic associations, which IAN, MINATOME and ENUSA have now begun to evaluate in the hope of obtaining specific data by the end of 1980.

### MANIFESTACIONES URANIFERAS CONOCIDAS EN COLOMBIA.

Basándose en un informe interno titulado "Posibilidades Uraníferas en Colombia", elaborado por el autor en 1973, y gracias a los trabajos de dos empresas extranjeras, TOTAL-MINATOME (Francia) y ENUSA (España) con técnicas radiométricas viales, prospecciones a pie (esporádicamente aérea) y métodos geoquímicos (sedimentos y aguas), se han encontrado más o menos 260 anomalías uraníferas (106 en 1973) tras haber trabajado el 30% de las áreas consideradas en prioridades I, II, III (321 000 km<sup>2</sup>) y 16 000 km de la red vial nacional (unos 44 000 km). Estos resultados, además de apoyar la selección preliminar, indican una notable variabilidad de condiciones geológicas y asociaciones metalogénicas, las cuales han empezado a ser evaluadas por el IAN, MINATOME y ENUSA, esperándose obtener datos concretos para finales de 1980.

## 1. INTRODUCCION

Este informe corresponde a un resumen de las actividades desarrolladas durante 23 años por el Instituto de Asuntos Nucleares (entidad descentralizada perteneciente al Ministerio de Minas y Energía) a través de su División de Materias Primas, en cumplimiento de las labores ordenadas por sus estatutos de fundación, cuyo objetivo fundamental ha sido prospectar uranio en el territorio nacional.

## 2. GENERALIDADES GEOGRAFICAS

El territorio colombiano ( $\pm 1\,150\,000\text{ km}^2$ ) presenta las más variadas condiciones topográficas y climáticas.

Los rasgos principales están constituidos por la terminación septentrional de la Cordillera de los Andes, que en Colombia se divide en tres ramas denominadas Cordilleras Occidental, Central y Oriental, con alturas variables que alcanzan su máximo en el Nevado del Huila (C. Central), con 5750 m sobre el nivel del mar. En la Sierra Nevada de Santa Marta se ubica la máxima altura del país (5775 m), lo que constituye en el extremo norte un fenómeno aislado.

Estas condiciones tan variables en todos los aspectos dificultan grandemente las labores de la Geología en general y de prospección de minerales radiactivos en particular, haciendo que los trabajos se desarrollen de modo lento en comparación con otros países.

Es necesario aclarar que en Colombia estamos atravesando lentamente por un estado inicial similar al vivido hace 5 a 10 años por algunos de los países latino-americanos respecto a la búsqueda de uranio.

## 3. MANIFESTACIONES URANIFERAS CONOCIDAS EN COLOMBIA

### 3.1. Antecedentes

Aunque se ha hablado de uranio desde 1910 [1] en las regiones de California (Santander) y Bochalema (norte de Santander), en el período 1949–54 se hicieron esporádicos trabajos en su mayor parte en las localidades antes mencionadas.

El Instituto de Asuntos Nucleares (IAN) por decreto de fundación (1955), fue encargado de las labores prospectivas de uranio, pero por diferentes razones éstas fueron discontinuas hasta 1969, y generalmente contaba con un solo profesional. Pero desde 1970 el número de profesionales fue de 3 ó 4, pasando a 6 en 1976/77.

En 1967, una vez estudiados los escasos trabajos referentes a uranio y tras una exhaustiva revisión de los registros gammapetroleros existentes en el Ministerio de Minas y Energía — obteniéndose dos anomalías, un control radiométrico de más de setenta mil especímenes de roca colectados por el antiguo Servicio Geológico (posteriormente INMINERO (1967), hoy INGEOMINAS) en sus diferentes subse-des de Bogotá, Bucaramanga, Ibagué y Popayan — que permitieron descubrir 4 anomalías, un examen de las consideraciones bibliográficas de geología regional colombiana en relación con los conceptos internacionales que determinaban las características más favorables para la existencia de uranio y que tenían en cuenta las rocas protoras, conceptos lito-estratigráficos tectónicos, constitución del basamento cristalino y, por razones de ubicación, la accesibilidad topográfica o vial, así como basándose en los trabajos de cartografía y fotogeología existentes, se seleccionaron diferentes áreas distribuidas en tres categorías de prioridad (véanse el Cuadro I y la Fig. 1).

### CUADRO I. REPARTICION DE LAS ZONAS FAVORABLES SEGUN PRIORIDADES

Categoría de prioridad	Superficie en km <sup>2</sup>
I	78 300
II	45 900
III	196 800
Total	321 000

De la superficie total del país, más o menos el 28% encerraba, pues, posibilidades. Por otra parte, muchas de esas áreas — sin reconocimiento de campo — irían reduciéndose paulatinamente a medida que avanzaran las labores “radiométrico-geológicas generales”.

El IAN se propone la tarea de revisar esta selección con base a la información obtenida mediante los contratos de exploración firmados con dos compañías extranjeras: TOTAL-MINATOME (Francia) y ENUSA (España); desde luego se hará con su colaboración para poder armar patrones selectivos con el obvio e insustituible control de campo.

En 1973, pese a los pocos datos existentes acerca de las posibilidades uraníferas en el país y a las escasas disponibilidades presupuestales y de personal, el IAN obtuvo resultados halagadores mediante:

- 1) Elaboración de perfiles verticales y transversales geológico-radiométricos en diferentes localidades de las áreas escogidas como prioritarias.
- 2) Levantamientos radiométricos-viales (Carborne) en forma departamental.
- 3) Geoquímica regional en sedimentos, sistematizada recientemente para aguas en sectores anómalos conocidos en primera instancia y, luego, como técnica rápida y relativamente fácil de aplicar en grandes áreas.

En ese año ya se poseían 106 anomalías y se había cubierto el 5% de las áreas en prioridades I y II. Se destacó que el mayor número de anomalías y rocas más favorables uraníferas se hallaban en la Cordillera Oriental y sobre el flanco oriental de la Cordillera Central, siendo notable la variabilidad de condiciones geológicas y asociaciones metalogénicas tanto en rocas sedimentarias como en ígneas y metamórficas. Se puede deducir, pues, que ni TOTAL (MINATOME) ni ENUSA, partieron de cero en sus labores prospectivas uraníferas en Colombia y la prueba

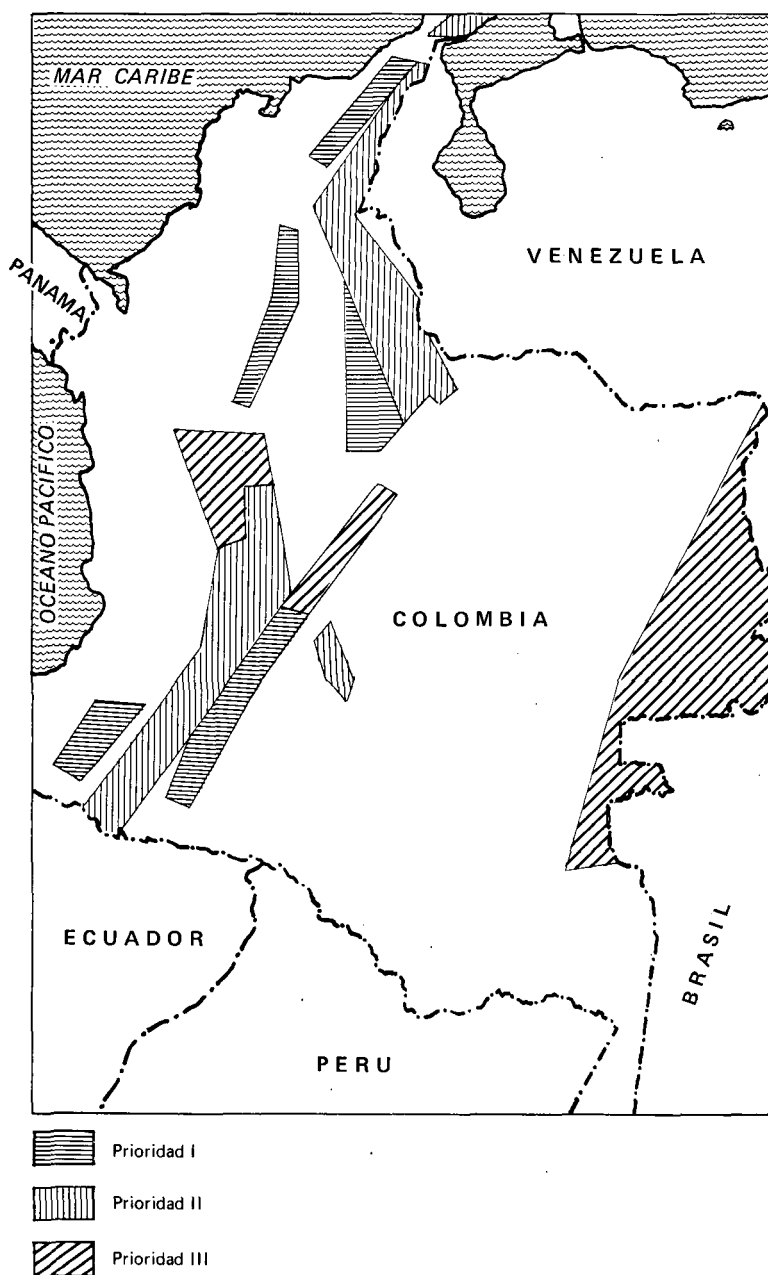


FIG.1. Selección de áreas favorables para la búsqueda de uranio.

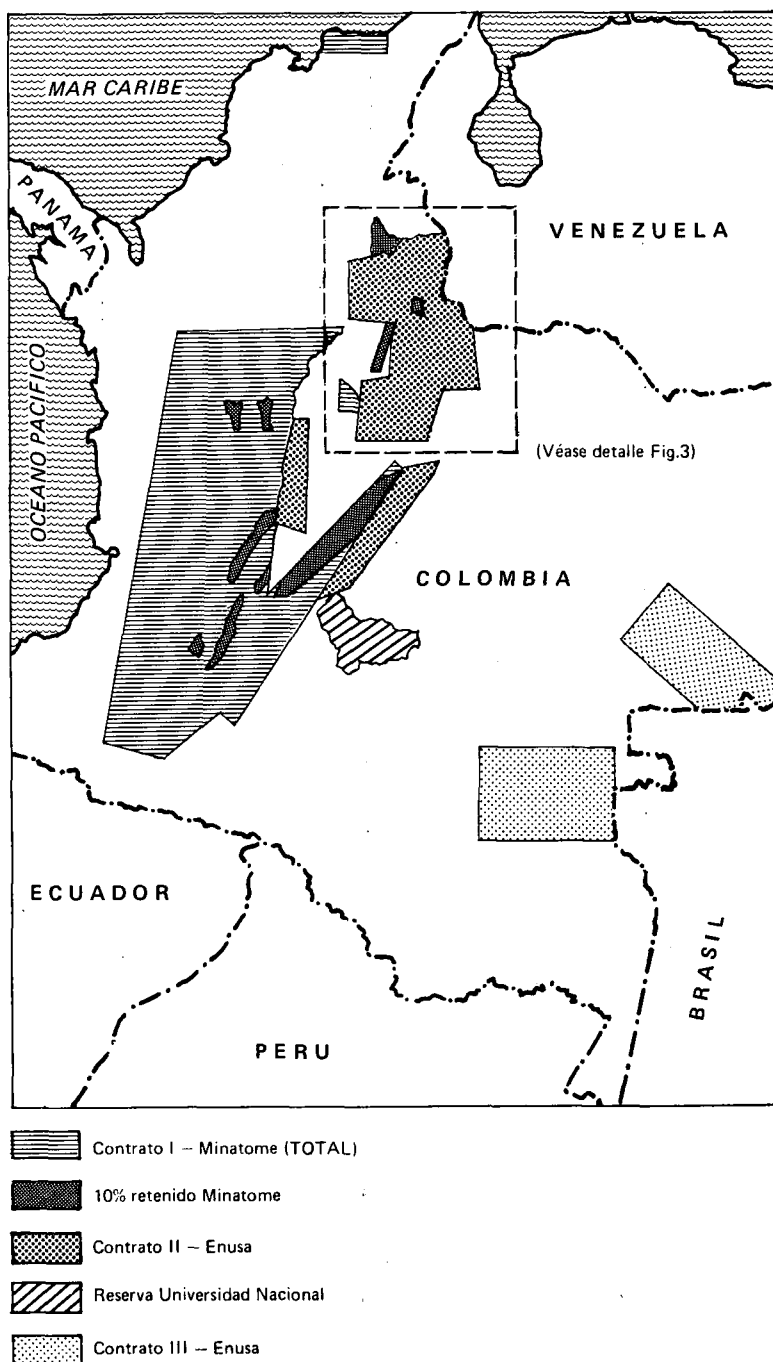


FIG.2. Manifestaciones uraníferas conocidas en 1978.

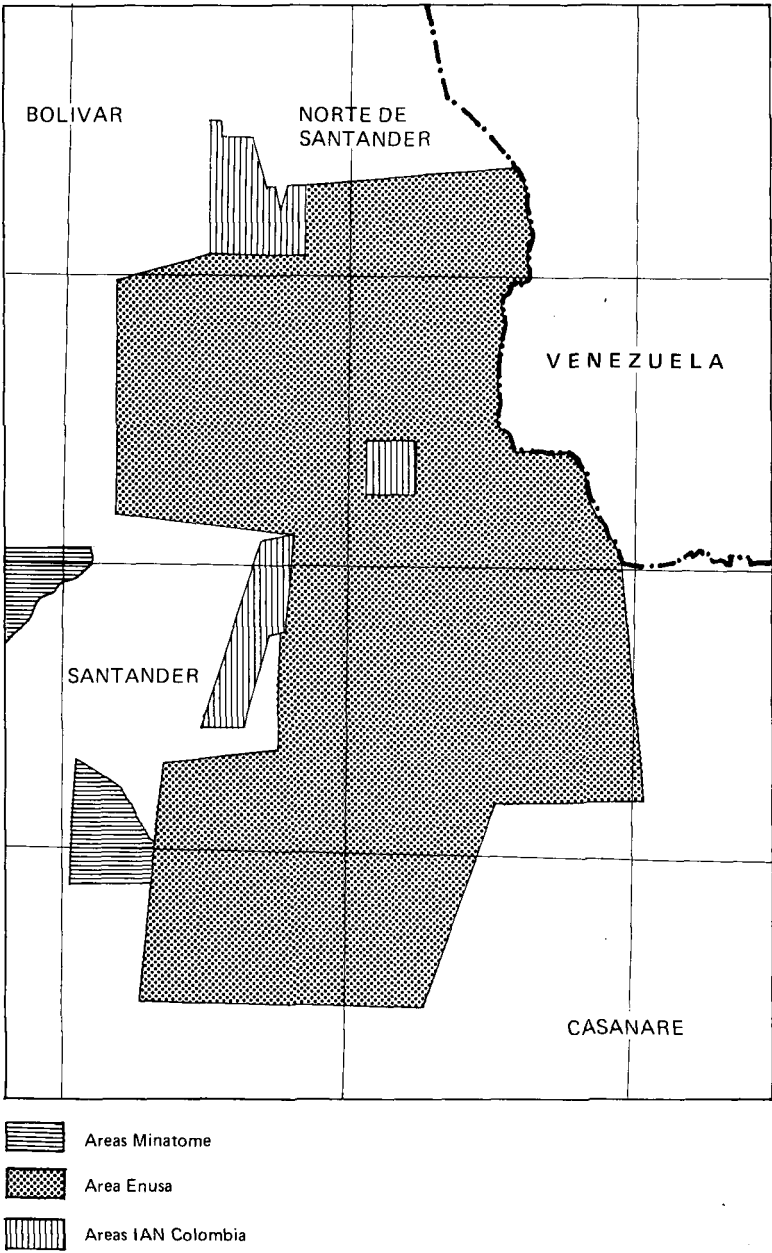


FIG.3. Noroeste de Colombia. Areas de prospección. (Véase ubicación en Fig. 2.)

más explícita está en que el 85% de las áreas seleccionadas están incluidas en los 3 contratos firmados: el primero, en 1976 con TOTAL-MINATOME (156 000 km<sup>2</sup>); el segundo, en 1977, con ENUSA (58 371 km<sup>2</sup>); y el tercero, en 1978, con ENUSA también (58 050 km<sup>2</sup>). La participación del IAN es del 51% y la de las compañías extranjeras del 49%.

De igual manera, en 1976, con la aplicación de los tres sistemas de trabajos antes mencionados y, esporádicamente, prospección aérea no sistemática (usada por MINATOME y ENUSA), se logró ubicar más o menos 260 anomalías uraníferas, después de haberse trabajado el 30% de las áreas consideradas en prioridades I, II, III (321 000 km<sup>2</sup>) y 16 000 km de la red vial nacional ( $\pm$  44 000 km) (Figs 2, 3).

Las manifestaciones uraníferas conocidas van a ser descritas someramente y sin dar datos concretos ya que se trata de áreas trabajadas por compañías asociadas (Figs 2,3).

### 3.2. Manifestaciones uraníferas en pegmatitas

Existen numerosas localidades con manifestaciones uraníferas de este tipo, principalmente en los departamentos santandereanos de Huila, Tolima, Antioquia e Intendencia del Caquetá.

En las diferentes localidades del norte de Santander se han registrado hallazgos de autunita, metautunita, becquerelita y uraninita [2, 3, 4], con contenido de uranio de 1 a 17 kg/t de roca, pero en realidad se trataba de simples bolsones sin interés económico.

### 3.3. Manifestaciones uraníferas vetiformes

En el municipio de California (Santander), desde hace varios años se conoce un yacimiento de pechblenda y coffinita con ley que varía entre 0,05–2,0% de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, y rocas perfiríticas y gnéicas, que J.A. Bueno [5] considera de carácter meso-epiternal. Se trata de una brecha remineralizada en paragénesis con impregnaciones piríticas y acompañada de venillas de blenda, galena, calpirita, sulfuros y sulfoarseniuros de oro y plata.

Otras manifestaciones uraníferas vetiformes muy erráticas fueron encontradas en Pamplona y Arboledas, Rodríguez (1967) y Onzage (1972), en la zona de contacto entre granitos y rocas gnéicas y/o esquistosas. Recientemente (1977) MINATOME halló numerosas localidades anómalas en los departamentos de Antioquia y Caldas, en donde existen rocas esquistosas verdes graáficas (paleozoicas) intruidas por rocas graníticas y cuarzomonzoníticas (jurásico-triásicas), que a su vez presentan intrusiones y efusiones básicas (gabros, diabasas y basaltos) con pirita y cobre nativo.

Las anomalías se manifiestan en las zonas cizalladas asociadas con diaclases, en las que son visibles algunos minerales amarillos de uranio (autunitas) con relativa continuidad ( $\pm 3-5$  km por sector anómalo).

### **3.4. Manifestaciones uraníferas en rocas ígneas intrusivas o extrusivas y/o en rocas metamórficas**

Característicamente, tanto en la Cordillera Central como en la Oriental se presentan estas rocas con un "background" alto, hallándose algunas localidades anómalas —ubicadas por el IAN, MINATOME y ENUSA, cuya radiactividad fluctúa entre 500 y 14 000 c/u (centellador SPP-2) y los tenores entre 0,05 y 1,6% de  $U_3O_8$ . Se trata de intrusivos — diferentes edades — de composiciones muy variables, desde graníticos, cuarzomonzoníticos, granodioríticos hasta dioríticos y efusivas riolíticas, andesíticas e incluso basálticas (Irra, Caldas), que atraviesan diferentes rocas metamórficas, en especial esquistos verdes — grafiticos — anfibólicos y algunos gneises de composición intermedia.

No se puede dar mayor información pues en estos curiosos indicios se están ejecutando algunos trabajos tanto petrográficos como químicos.

### **3.5. Manifestaciones uraníferas en rocas sedimentarias**

Como es de conocimiento general, los mayores y más rentables yacimientos se ubican en rocas sedimentarias de facies continental o transicional; de igual forma, los considerados de baja ley se encuentran en rocas sedimentarias de facies marina, que solo en casos especiales son rentables.

Las labores del IAN y de las compañías asociadas han demostrado la existencia de buenas manifestaciones distribuidas a lo largo de la columna geológica desde el Paleozoico (Carbonífero), Triásico-Jurásico, Cretáceo (Medio Superior) hasta el Terciario (Mioceno — Oligoceno).

## **4. DISTRIBUCION LITOCRONOLOGICA**

Se describe a continuación esta amplia distribución litocronológica, partiendo de la era más antigua a la más reciente.

### **4.1. Paleozoico (Carbonífero)**

Se trata de una secuencia deltaica lagunar (D. Biguer, 1977 — MINATOME, 1977), cuyo espesor no se ha podido estimar, aunque se considera que no sobrepasa los 400 metros, y consta de una sucesión arcillo-arenosa-conglomerádica separada por tres niveles calcáreos con alternancia de facies oxidadas y reducidas.

Los horizontes mineralizados son muy variables: unas veces se presentan en forma lenticular, otras van ligadas a zonas arcillosas reducidas, y otras en canales arenosos asociados a materia orgánica. Se trata de mineralizaciones con control litológico petrográfico y tectónico (R. Braun y C. Perrin, 1977).

Aquí las anomalías poseen tenores que varían entre 0,1 a 3,8% de  $U_3O_8$ .

El hecho de existir únicamente 4 meses con relativo bajo índice pluviométrico y la dificultad topográfica (200 m.s.n.m. hasta 3800 m.s.n.m.) han entorpecido el desarrollo de esta importante área, en la que se han iniciado labores de evaluación, lográndose identificar microscópicamente pechblenda y coffinita en paragénesis con cobre, plata, cobalto y níquel.

## 4.2. Jurásico

El sector anómalo está representado por la formación Girón, constituida por tres conjuntos caracterizados por su homogeneidad litológica con un espesor de 1200 a 1500 m:

### 4.2.1. Conjunto La Lajita

Está representado por una sucesión de arcillolitas, limolitas con intercalaciones esporádicas de areniscas finas de color rojo; aun cuando se encuentran lentes locales verdes, se observa laminación paralela y óndulas (ripple marks). La textura fina de estos sedimentos se puede asociar a facies de bancos rojos (red beds) en un ambiente de depositación tranquila, posiblemente de llanura fluvial.

### 4.2.2. Conjunto La Laja

Granulometría fina y media representada por areniscas arcósicas de colores grises, verdes o rojizas, con pirita y magnetita como accesorios; se notan dos secuencias arenosas separadas por una serie lutítica roja principalmente.

La secuencia arenosa inferior se caracteriza por bancos masivos de forma lenticular con contacto basal erosional o abrupto, el que se compone de areniscas gruesas conglomerádicas seguido por areniscas más finas con estratificación cruzada de gran escala, estratificación entrecruzada, laminación paralela y gradación normal [6].

La secuencia superior está constituida por areniscas de grano fino a medio con limolitas y argilitas (lutitas) rojas, en bancos menos espesos y presencia de laminación simple y laminación paralela. Esta secuencia presenta un color rojo predominante (facies oxidante), mientras que la parte inferior es verde o gris verdosa (facies reductora).

Un constituyente abundante es la materia orgánica que se presenta en forma diseminada y/o lenticular de aspecto turboso.

La interpretación del ambiente, basándose en las facies finas, la evolución de estructuras sedimentarias y la variación lateral del conjunto, puede considerarse como un depósito de canales fluviales meandriformes, mientras las facies finas corresponden a depósitos de llanuras de inundación.

La presencia de dos secuencias arenosas y la variación lateral que caracteriza a este conjunto se puede explicar como la migración lateral y vertical de las corrientes meandriformes, que darían como resultado estos cuerpos arenosos.

#### 4.2.3. Conjunto La Cascada

Se caracteriza en que presenta las facies gruesas conformadas por conglomerados de areniscas conglomerádicas, areniscas de grano medio a grueso y lutitas de varios colores desde rojo hasta verde, presentando estratificación cruzada a gran escala y algunos bancos con gradación inversa con presencia de materia orgánica.

##### 4.2.3.1. Radiometría

La primera anomalía fue conseguida por Ortega [7]. Posteriormente, el IAN trabajó esta área obteniendo 10 anomalías más, después Rodríguez y Carvajal [8] lograron 20 zonas más y, por último, TOTAL (1977) completó la información preliminar que se poseía.

El sector anómalo tiene más o menos 400–600 km<sup>2</sup>, donde se han ubicado 76 anomalías (7 en el conjunto Lajita, 49 en Laja y 20 en Cascada) que varían entre 300 y 1100 c/s (SPP 2) y cuyos tenores fluctúan entre 0,02 y 0,54%, con un tenor medio de 0,15% de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>.

Las principales y mayores anomalías se sitúan en la parte superior del conjunto La Cascada y la parte basal del conjunto La Laja.

Las anomalías encontradas presentan relaciones muy similares:

- 1) Asociación con paleocanales de contactos basales y laterales abruptos caracterizados por una secuencia de areniscas gruesas en la base y una gradación a clastos finos hacia el tope. Las anomalías se sitúan en los bordes de los paleocanales y no en la parte central. Esta característica es típica del conjunto La Laja.
- 2) Asociación con facies reducidas ricas en materia orgánica magnetita y presencia de muscovita.
- 3) Existe un claro control litológico granulométrico, ya que los valores más altos se ubican en las facies finas, especialmente en la interfase entre areniscas con estratificación cruzada y en areniscas y lutitas con laminación paralela.
- 4) Como es tradicional en esta clase de yacimientos, existe estrecha relación con el control tectónico (fallas y fracturas).

Se notan algunos minerales amarillos y verdosos catalogados preliminarmente como metaautonita, metatorbernita y uranofana, pues nos parece de mayor importancia investigar el verdadero interés económico del área y, luego, entrar a estudiar la clase de mineral con su posible origen.

Adicionalmente, se han adelantado estudios en rocas sedimentarias de facies detríticas continentales o transicionales litocronológicamente equivalentes a las del grupo Girón, en donde se hallaron algunas pequeñas anomalías uraníferas asociadas con cobre en el Portillo (Santander), Monfort (Meta) y Villanueva (Guajira).

#### 4.3. Cretáceo (Medio Superior)

En la Cordillera Oriental destaca la manifestación de uranio en arcillas negras carbonosas (Cretáceo Medio), con un contenido uranífero anormal de 100–200 ppm de  $U_3O_8$  y concentraciones vanadiníferas con tenores de 1200–10 000 ppm que fueron ubicadas en los Departamentos de Boyacá, Santander y Cundinamarca.

Consideramos que estas importantes manifestaciones de vanadio pueden ofrecer perspectivas halagüeñas en la búsqueda de uranio, como subproducto de éste, si se logra comprobar suficiente magnitud y continuidad.

También en el Cretáceo Medio marino, pero sobre la Cordillera Central, al extremo sur de Antioquia y norte de Caldas, halló MINATOME (1977) una secuencia areno-arcillosa negra que se ubica dentro de una fosa tectónica con relativa extensión lateral (4–5 km) y cuya continuidad es incierta; se encuentra fallada al O con un granito Alaskítico (Jurásico) y al E, también en contacto fallado, con esquistos negros biotíticos paleozoicos.

Se ubicaron areniscas y arcillas mineralizadas en sectores oxidados o reducidos. Se trata de areniscas fosfáticas de grano medio (5–22% de  $P_2O_5$ ) y tenores de  $U_3O_8$  fluctuantes entre 0,1 y 0,5% o más, con un valor medio de 0,3%. Adicionalmente presentan contenidos altos de vanadio (5%) y bario (1%).

Nuevamente en la Cordillera Oriental, pero ahora sobre el Cretáceo Superior, se puede decir que el mayor número de anomalías radiométricas encontradas se ubican en las formaciones portadoras de fosfatos, tanto en los dos Santanderes como en Boyacá, Cundinamarca, Tolima y Huila, con contenidos uraníferos que varían entre 80 y 350 g/t y un tenor medio de 150 g/t.

Las fosforitas estudiadas hasta ahora son característicamente delgadas (0,5–2,8 m), con contenidos fosfáticos relativamente constantes y de las que, según INGEOMINAS, se poseen 400 millones ( $P_2O_5$ ) de toneladas probadas. Esto nos permitiría contar con  $\pm 60\,000$  t de  $U_3O_8$  como yacimientos de baja ley; pero sin olvidar, claro está, que en el mundo existen pocos yacimientos rentables de este tipo y que se deberían efectuar exhaustivos y costosos estudios preliminares de recuperación.

#### 4.4. Terciario (Oligoceno)

En el SE de Colombia se conoce una sucesión detrítica continental (formación Gualanday) constituida por la alternancia (250–1600 m) de arcillolitas y limolitas rojas y grises (localmente verdosas) con areniscas y conglomerados parcialmente feldespáticos de igual tonalidad.

La alternancia de sedimentos gruesos y finos es común; no así la presencia de materia orgánica ni de zonas oxidantes y reductoras, que es en donde se han ubicado la mayor parte de las anomalías –areniscas y arcillolitas grises o verdosas – cuyos tenores fluctúan del 0,02 al 0,5% de  $U_3O_8$ .

Vale la pena señalar que esta secuencia sedimentaria se encuentra siempre alrededor de terrenos cristalinos.

Como en casos anteriores, no se entra en mayores detalles por la restricción previamente impuesta.

### 5. OTRAS MANIFESTACIONES Y/O ROCAS FAVORABLES

Se conocen numerosas anomalías radiactivas que son más toríferas que uraníferas, así:

- a) Sierra Nevada de Santa Marta, gran secuencia metamórfica de grado medio a bajo, con intrusivas y extrusivas de carácter intermedio de diferentes edades y la presencia de sedimentarias jurásicas (F. Guatapuri); lito-cronológicamente es correlacionable con la formación Girón.
- b) Macizo de Garzón, de cierta similitud con la anterior.
- c) Sedimentos cretáceos, con areniscas de grano variable y abundante materia orgánica en contacto fallado con rocas graníticas del Macizo de Garzón.
- d) Al SO de Colombia (Valle del Cauca), en el terciario, se hallan facies detríticas favorables que incluso son ricas en materia orgánica. Pero ha de considerarse que el mayor porcentaje de rocas intrusivas y extrusivas es de carácter básico o ultrabásico – región platinífera por excelencia – y, como es obvio, no presenta anomalías superficiales.

### 6. CONCLUSIONES

- 1) El futuro colombiano en materia de radiactivos es optimista – pese a que aún no se puede hablar en términos específicos (tonelajes), si consideramos el esquema antes expuesto y que faltan por conocer las verdaderas perspectivas de más del 70% de las áreas prioritarias. Además, tan solo en 1978 se iniciaron labores (MINATOME) para determinar si realmente existe algún yacimiento económicamente explotable. Por otra parte, debe pensarse que aunque existen

260 sectores anómalos, estos no son puntuales sino areales, así por ejemplo, a Zapatoca le corresponden 76 anomalías que en 1979 serán evaluadas con trabajos de detalle e inclusive con algunas perforaciones.

- 2) Claramente se ponen de manifiesto los diferentes estados por los que ha pasado la División de Materias Primas del IAN, dependiendo de las necesidades y objetivos indicados por la demanda de uranio a nivel mundial.
- 3) Es evidente la falta de personal especializado en técnicas específicas cuyo objetivo sea el hallazgo de uranio. Esta cuestión, y la inexistencia de presupuestos adecuados, obligó a nuestro gobierno a recurrir al tipo de asociación iniciado en 1976, es decir, un 51% de participación por parte del IAN y un 49% a cargo de empresas extranjeras.
- 4) Tendremos que aclarar las posibilidades de los materiales radiactivos en los diferentes eventos como rocas intrusivas y extrusivas, sin considerar composición ni edad, para saber cuáles serían las mejores rocas protoras a considerar.

## REFERENCIAS

- [1] LLERAS CODAZZI, R., Los Minerales de Colombia (1903), Bibl. Museo Nacional, Bogotá (1927) 128.
- [2] ARCE, H.M., «Informe preliminar sobre las pegmatitas uraníferas del Norte del Santander», Serv. Geol. Nal., Bogotá, Informe N° 702 (1950) 1-6.
- [3] ACOSTA, L.R., «Prospección radiométrica regional de los Municipios de Bochalema y Chinácota (Norte de Santander)», Informe del IAN, Bogotá (1967) 3.
- [4] MENDOZA, P.J., «Pegmatita uranífera en la Playa, Norte de Santander», Informe del IAN, Bogotá (1971) 1-6.
- [5] BUENO, J.A., Yacimientos de uranio y otros metales en la region de "La Baja", Municipio de California, Dpto. de Santander, Serv. Geol. Nal., Bogotá III 3 (1955) 1.
- [6] ALUJA, S.A., «Informe geológico radiométrico de las regiones Zapatoca y Serranía de los Cobardes», Informe del IAN N° 58 (1976) 1-36.
- [7] ORTEGA, M.C., Indicio uranífero en el área del Zapatoca (Santander), Comunicación verbal, Bogotá, 1974.
- [8] RODRIGUEZ, T.C., CARVAJAL, D., Geología y radimetría del NO de Zapatoca (Santander), Trabajo de Tesis, Bogotá (1976) 1-80.

## DISCUSSION

P.M. BARRETTO: I would like to know whether the ENUSA and MINATOME companies could provide any additional information about the favourability of zones or geological formations other than the Cretaceous-Triassic.

J.A. FERNANDEZ: Other types of anomalies worthy of note are:

- (1) A recent travertine formed at the expense of thermal waters that cross some rhyolites. It is not known whether the uranium comes from the leaching of

- the rhyolites or from phosphated formations in the surrounding Upper Cretaceous.
- (2) An anomaly in a chert associated with a phosphated formation of the Upper Cretaceous in intrusive contact.
  - (3) A stratiform anomaly of unknown size in the lutites of the Villavicencio Carboniferous.
  - (4) Probable deposits related to the Shield (carbonatites, pegmatites, veins), possible Roraima Formation and other discordances with the Shield.
  - (5) Pegmatite anomalies in the Quetame massif.

**J.E. MENDOZA:** In addition to what has been said by Messrs Rodriguez and Fernandez, may I just add something about other anomalies detected in the prospecting work carried out by the Colombian company ENUSA. In the Tertiary (Oligocene) rocks in the middle to upper valley of the Rio Magdalena, geochemical methods have revealed anomalies in the St. Teresa Formation, which is composed essentially of quartzose friable sandstones and highly oxidized conglomerates. The area is well known for its low radioactivity resulting from powerful washing of the rock and strong oxidation. As a result of the chemical studies on the water and sediments, greater attention will be given to this area in future. Another anomalous area, which can be correlated with the Uribante Basin (Venezuela) discussed elsewhere by Mr. Pasquali, is the La Luna Formation (Upper Cretaceous), which contains phosphatic uraniferous rocks. These rocks extend towards the south all along the eastern Cordillera; in the middle valley of the Rio Magdalena they lose thickness but show a considerably increased uranium concentration. Although these are different sedimentary basins, they can be correlated chronologically. Finally, I may add that uraniferous anomalies have been found from the Precambrian to the Quaternary and these are now being evaluated.

**J.A. TORRES:** Other anomalies in Colombia are those found inside pegmatitic dykes (with rose feldspar quartz and muscovite), which cut a sequence of amphibolites and gneiss considered to be Precambrian. These dykes also seem to have a very old age associated with granitization processes. The U/Th ratio seems to be about 1, although there is possibly a slight Th predominance. Anomalies are also known in Jurassic (?) tuffs but no chemical analyses are yet available.

**J. SOSA:** What type of evaluation is currently being made of the reported anomalous areas?

**H. RODRIGUEZ:** This is exactly the work we intend to carry out in 1979; it was started in 1978 and we hope to get definite results by 1980.

**J. SOSA:** What is the significance of the radioactive anomalies associated with copper mineralization in the prospected areas?

**H. RODRIGUEZ:** Although there is clear U-Cu paragenesis in 20 or 30 locations, no work has yet been done to confirm the situation.

# URANIUM IN BRAZIL

J.G. AYRES  
NUCLEBRAS (DRM),  
Fortaleza,  
Brazil

## Abstract-Resumen

### URANIUM IN BRAZIL.

The results obtained by the uranium exploration programme which has been under way for the last few years are summarized. So far NUCLEBRAS has identified eight areas with uranium resources: (1) *Poços de Caldas (Minas Gerais)*: It has three main types of uranium mineralization identified as (a) primary, related to hydrothermal, deuteric activities, or both, (b) primary, related to volcanic breccia chimneys, and (c) secondary, related to weathering phenomena. The total resources in this area have been calculated at 26 800 t of  $U_3O_8$ .

(2) *Figueira (Paraná)*: In this area 8000 t of  $U_3O_8$  were found and the uranium mineralization is associated with sandstones, carbonaceous siltites and coal seams. The mineralization consists mainly of uraninite and uranocircite. (3) *Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais)*: Both in the Gandarela area and in Serra das Gaivotas uranium occurs chiefly in the form of uraninite (and some pitchblende) in oligomictic conglomerates with quartz matrix generally rich in pyrite.

The resources at the Quadrilátero Ferrífero are estimated at 15 000 t of  $U_3O_8$ . (4) *Amorinópolis (Goiás)*: The mineralization is of the 'roll front' type associated with beds of arkosic conglomerate sandstones of the Ponta Grossa Formation. The main minerals are pitchblende (or uraninite or both) and coffinite with associated autunite and sabugalite. The resources have so far been calculated for only six ore bodies and amount to 5000 t of  $U_3O_8$ .

(5) *Campos Belos (Goiás)*: Almost the entire mineralization is related to quartz veins in fractures in cataclastic 'schists' of the Araxá group. So far the resources in this area have been estimated at 1000 t of  $U_3O_8$ .

(6) *Itaia (Ceará)*: Uranium is associated with a phosphatic material called 'collophanite' filling fractures or cavities, or both, in rocks of the region. The uranium-bearing mineral has not been identified yet. To date, the resources in this region are estimated at 71 000 t of  $U_3O_8$ .

(7) *Lagoa Real (Bahia)*: The uranium mineralization occurs in the form of uraninite and pitchblende and, secondarily, uranophane and gummite, and is associated with albite-pyroxene-gneiss bodies. The resources so far amount to 5500 t of  $U_3O_8$ . (8) *Espinharas (Paraíba)*: The uranium mineralization occurs in dykes of feldspathic rocks within gneisses. The operations of NUCLAM at this site have so far identified resources of the order of 10 000 t of  $U_3O_8$ .

### EL URANIO EN EL BRASIL.

Se presentan en forma resumida los resultados del programa de exploración de uranio que se está ejecutando desde hace algunos años. Hasta la fecha, NUCLEBRAS ha encontrado ocho zonas con recursos uraníferos: 1) *Poços de Caldas (Minas Gerais)*.— Tiene tres tipos principales de mineralización de uranio definidos como: a) mineralización primaria, relacionada con actividades hidrotermales, deutéricas o ambas, b) mineralización primaria, relacionada con chimeneas de brecha volcánica, y c) mineralización secundaria, relacionada con fenómenos de meteorización. Los recursos totales en esta zona se han calculado en 26 800 t de  $U_3O_8$ . 2) *Figueira (Paraná)*. — En esta zona se han hallado 8000 t de  $U_3O_8$  y la mineralización de uranio está asociada con areniscas, limonitas carbonosas y mantos de carbón. La mineralización

está formada sobre todo por uraninita y urano-circita. 3) *Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais)*. — Tanto en la zona de Gandarela como en Serra das Gaivotas, el uranio se presenta principalmente en forma de uraninita (y alguna pechblenda) en conglomerados oligomícticos con una matriz de cuarzo generalmente rica en piritita. Los recursos del Quadrilátero Ferrífero se estiman en 15 000 t de  $U_3O_8$ . 4) *Amorinópolis (Goiás)*. — La mineralización es del tipo de "frente ondulado", asociada con estratos de areniscas de conglomerados arcóscicos de la formación Fonta Grossa. Los principales minerales son pechblenda (o uraninita, o ambos) y cofinita con asociación de autunita y sabugalita. Los recursos, que se han calculado hasta la fecha solo para seis cuerpos mineralizados, ascienden a 5 000 t de  $U_3O_8$ . 5) *Campos Belos, (Goiás)*. — Casi toda la mineralización está relacionada con venas de cuarzo en fracturas situadas en "esquistos" cataclásticos del grupo Araxá. Hasta ahora los recursos de esta zona se han estimado en 1 000 t de  $U_3O_8$ . 6) *Itaiaí (Ceará)*. — El uranio está asociado a material fosfático denominado "colofanita" que llena las fracturas o cavidades, o ambas, de las rocas de la región. El mineral uranífero no se ha identificado aún. Actualmente, los recursos de esta región se estiman en 71 000 t de  $U_3O_8$ . 7) *Lagoa Real (Bahia)*. — La mineralización de uranio aparece en forma de uraninita y de pechblenda y, secundariamente, uranofano y gummita, estando asociada a cuerpos de albita-piroxeno-gneis. Por ahora los recursos ascienden a 5 500 t de  $U_3O_8$ . 8) *Espinharas (Paraíba)*. — La mineralización de uranio se manifiesta en diques de rocas feldespáticas dentro de gneises. Con los trabajos de NUCLAM en este lugar se han descubierto hasta la fecha recursos del orden de 10 000 t de  $U_3O_8$ .

## 1. INTRODUCTION

Systematic prospecting for radioactive minerals, begun in 1952 by the Brazilian National Research Council, led at that time to the discovery of the first indications of uranium at Poços de Caldas (Minas Gerais) and Jacobina (Bahia). This phase of activities depended initially on foreign know-how. In 1955 technical co-operation agreements were signed with the government of the United States of America for the reconnaissance of Brazil's uranium potential. In 1962 the recently created National Nuclear Energy Commission/Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) sought the collaboration of the French Centre d'Etudes Nucléaires (CEA) in organizing its Mineral Exploration Department.

In the 1970s more financial resources were made available for radioactive mineral prospecting exclusively through the CNEN. With the founding of NUCLEBRAS in December 1974, the Brazilian government's efforts received an impetus in the basic part of the nuclear programme, namely, the exploration, development and mining of uranium deposits. The results since obtained have led to the identification of resources which are at present sufficient to supply 35 nuclear power plants of the 1300 MW type for their total operating lives.

Federal German participation in the uranium exploration sector is restricted to the activities of NUCLAM, a subsidiary of NUCLEBRAS, established under an agreement with the Federal Republic of Germany in association with the Uran-gesellschaft.



FIG.1. Location of uranium reserves.

Organizationally, within the Department of Mineral Resources, there are three divisions concerned with uranium exploration:

- (a) Division of Geology – responsible for geological analysis and evaluation on a wide scale and for selection of large target areas
- (b) Division of Exploration – responsible for field operations from regional scale work to detailed exploration of a deposit
- (c) Division of Mineral Engineering – responsible for the development of uranium extraction processes, determination of mining methods, and design and basic planning on industrial complexes.

The evaluation of the economic production potential of uranium concentrates of a particular area is done through the interaction of these three divisions.

In carrying out its functions NUCLEBRAS makes routine use of the services of national service enterprises specialized in exploration, drilling, geophysical surveys, etc. Its own activities are concentrated in more specific and specialized sectors.

It should be pointed out that every indication of mineralization found is being investigated. Generally speaking, no attempt is made to transfer models of deposit environments that exist in other countries. So far, most deposits which have been or are being evaluated in Brazil have exhibited characteristics of their own. As a result of its efforts to date NUCLEBRAS has identified eight areas with uranium reserves, namely, Poços de Caldas plateau, Minas Gerais; Figueira, Paraná; Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais; Amorinópolis, Goiás; Campos Belos, Goiás; Itataia, Ceará; Lagoa Real, Bahia; Espinharas, Paraíba (investigated by NUCLAM), see. Fig. 1.

## 2. BRAZILIAN DEPOSITS

### 2.1. POÇOS DE CALDAS DEPOSIT, MINAS GERAIS

#### 2.1.1. Background

The earliest reference to the existence of zirconium minerals in the Poços de Caldas plateau was made by O. Derby in 1877. In 1948 the presence of radioactive material in zirconium minerals was established from photographic plates. Samples studied at the National Department of Mineral Production/Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) showed that the radioactivity was due to uranium, and this was confirmed in the United States of America in 1952 by radiometric determinations. Subsequent evaluation of the uranium potential of the plateau led to the identification of several zircono-uraniferous (caldasite) deposits containing between 50 000 and 250 000 t of zirconium ore with an average uranium concentration of 0.5%. This would correspond to 250 to 1250 tonnes of uranium and such limits were too imprecise for investment decisions.

In 1962 systematic exploration for uranium started and the Cercado mineralization was located at the surface. During 1966 and 1970 detailed exploration and evaluation were carried out, including the identification and underground work at the Agostinho deposit.

The creation of NUCLEBRAS in 1974 gave new impetus to the exploration at Poços de Caldas, accelerating work in the Cercado area which was considered to be the most promising for meeting, in the short term, the requirements for the Brazilian nuclear programme.

The Poços de Caldas industrial complex is expected to go into operation towards the end of 1979; the mill built there is designed for an annual production capacity of 500 t/a of uranium concentrate.

### 2.1.2. Location and access

The Cercado deposit is situated inside the large circular intrusion of alkaline rocks which constitute the Poços de Caldas massif, located in the southeastern region of Minas Gerais state, and connected by good paved highways with São Paulo (260 km), Belo Horizonte (480 km), and Rio de Janeiro (500 km). It is linked to the railway network and served by a regional air transport system with regular flights to Rio de Janeiro, São Paulo and Belo Horizonte.

The Cercado deposit is located about 25 km to the south of the town of Poços de Caldas. The Poços de Caldas plateau is almost circular in shape with a diameter of about 30 km. The average altitude within the plateau is 1300 m and the altitude of the surrounding region does not exceed 800 m. A ring of mountains forming an annular dyke, varying from 1500 to 1700 m, constitutes the boundary of the alkaline intrusion and is an integral part thereof.

### 2.1.3. Regional geology (Fig.2)

This alkaline complex is situated in the South Brazilian Shield on the spurs of the Serra da Mantiqueira at the eastern boundary of the Paraná Basin. The alkaline nature of the area was first recognized by O. Derby in 1877.

The Poços de Caldas intrusion is part of a series of alkaline intrusions distributed through the central and southeastern regions of Brazil along the following directions: (1) Northeast direction, along the Brazilian coast, characterized by two lines of parallel intrusions. To this belong, among others, the massifs of Cananéia, São Sebastião, Cabo Frio and, further inland, those of Lages, Jacupiranga, Serrote and Itataia; (2) Northwest direction, roughly perpendicular to the former, comprising among others the Poços de Caldas, Araxá, Salitre, Patrocínio, Serra Negra, Catalão and Araguaína intrusions.

The Poços de Caldas intrusion is surrounded by outcrops of basement rocks consisting of granite and gneiss with predominant gneissification in the N40-70°W direction. These rocks are frequently intersected by diabase, amphibolite and tinguaitite dykes. Sandstones of Mesozoic age covering the basement appear to the west of the alkaline intrusion in the Águas da Prata region.

### 2.1.4. Lithology of the alkaline massif

The terms used for the rocks of the Poços de Caldas massif are those established by common usage and do not always correspond to their original petrographic definitions. The main types of rock are:

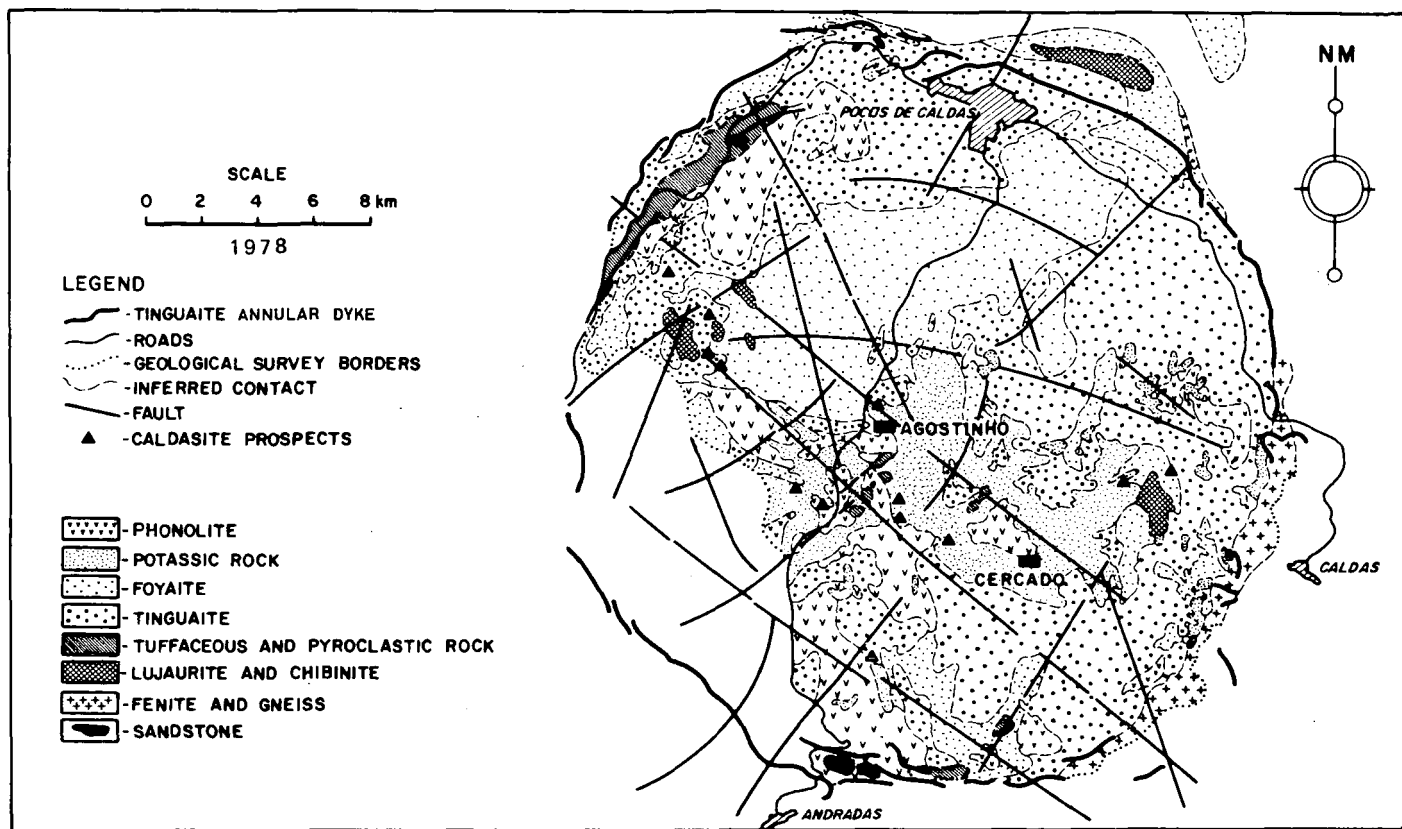


FIG.2. Simplified geological map of the Poços de Caldas plateau. The Agostinho and Cercado deposits are in the rejuvenated quadrant.

*Foyaite.* It is a leucocratic, holocrystalline rock of medium to coarse grain-size, sometimes pegmatoid. Feldspars (40–50% of the rock) are anorthoclase and orthoclase and, in smaller quantities, micro-perthitic microcline. Among the feldspathoids (20–25% of the rock) nepheline is predominant and generally interstitial. Leucite seldom occurs. Mafics (10–15%) are augite and aegirine. The accessory minerals are sphene, apatite, lamprophyllite, astrophyllite, eudialyte, eucolite, magnetite, zeolites and amphiboles. Zirconite crystals are rare.

*Tinguaite.* A leucocratic rock with mesocratic tendency, holocrystalline, of generally porphyritic texture but can be fine and equigranular. Feldspars and feldspathoids are in the same proportions as in foyaite. Pyroxenes are more abundant (15–20% of the rock). The necessary minerals are the same as in foyaite; varieties of tinguaite and pseudoleucite or analcime are frequent.

*Phonolite.* Its composition is identical with that of tinguaite but is aphanitic in texture and has variable proportions of vitreous matrix. At times, it shows typical fluidal structure of lava flow.

*Transition rocks.* There exist all the phases intermediate between foyaite, tinguaite and phonolite, sometimes described as microfoyaite or microtinguaite.

Other types of rock also occur, namely, tuffs, ankaratritic lavas, fenites, chibinites, lujaunites, biotite gneisses and sandstones. Occurrences of caldasite and bauxite are well known.

Regarding their surface expression the most important lithology consists of tinguaite that are quite faulted, diaclosed and intersected by breccia-like facies. An extensive foyaite massif occurs in the northern part of the plateau. The coarse syenitic rocks are less affected by the phenomena of faulting and brecciation. The contact evidence indicates that the smaller foyaitic massifs situated in the southern and southwestern quadrants of the plateau are younger and intrusive in the tinguaite rocks. This fact is important since the uraniferous mineralizations are associated with these intrusive foyaite. *Phonolitic rocks are more abundant in the areas NW and SW of the plateau. They are intensely fractured and brecciated in appearance.*

Rocks inappropriately termed 'potassic', i.e. with a high concentration of potassium (12–15%) and deficient in sodium (0.5%) and calcium (0.3%), originating from hydrothermal alteration and weathering of linguaite and phonolites, occur mainly in the central part of the plateau. They form a broad band of irregular contour, enclosing most of the important radiometric anomalies of the region. Mesozoic sandstones occur in irregularly shaped blocks in the neighbourhood of the southeastern, southern and northwestern boundaries of the plateau, constituting in the last-named area one of the largest outcrops (Véu das Noivas cascade).

#### 2.1.5. Regional tectonics

In the Poços de Caldas massif two main fault systems are clearly identified, in NE and NW directions, which correspond to the directions observed frequently

in the Brazilian Shield. This is an old tectonic system, rejuvenated several times. The intersection of the N40°E and N60°W faults, approximately at the centre of the plateau, delimits the rejuvenated eastern quadrant and encloses a large part of the uranium mineralizations. Apart from these two main fault directions, there are also the NS and EW directions, which are representative of phenomena restricted to the intrusive massif but are likewise important for the control of mineralization. Circular structures which intercept and dislocate the systems of linear tectonics also occur.

#### 2.1.6. Zircono-uraniferous mineralization

The study of the occurrences and prospects of zircono-uraniferous ore (caldasite) leads to the following conclusions:

- (a) The mineralizations occur in the form of discontinuous sub-vertical small and large veins of variable thicknesses, but rarely exceeding 10 cm.
- (b) The large veins are characterized by a succession of small lenses filling fracture and shear zones in mixture with clay material from the enclosing rocks.
- (c) The concentrations of zirconium vary from 40 to 75%  $ZrO_2$ , and the uranium increases with zirconium content, the average concentration being 0.34% of  $U_3O_8$ . This does not mean, however, that there is always a positive correlation between the percentages of the two elements nor that a rise in zirconium concentrations necessarily involves an equal rise in uranium.
- (d) Of the 40 sites of old prospects studied, more than 90% are of the vein type, while the remaining 10% are alluvial and eluvial deposits formed from the neighbouring veins.

#### 2.1.7. Uranium mineralization (Figs 3 and 4)

There are three principal types of uranium mineralization at Poços de Caldas, which are superimposed on one another at certain locations:

- (a) Primary mineralizations connected with hydrothermal phenomena
- (b) Primary mineralizations connected with chimneys of volcanic breccias
- (c) Secondary mineralizations connected with weathering phenomena.

The hydrothermal primary uranium mineralization is characterized by argillization phenomena and by the presence not only of uranium, but also of pyrite, fluorite, molybdenum and, in smaller quantities, zirconium and thorium. It occurs in the Agostinho deposit and in orebody A of the Cercado deposit in the form of systems of large and small veins which can have thicknesses of up to 5 m and be at depths of as much as 300 m.

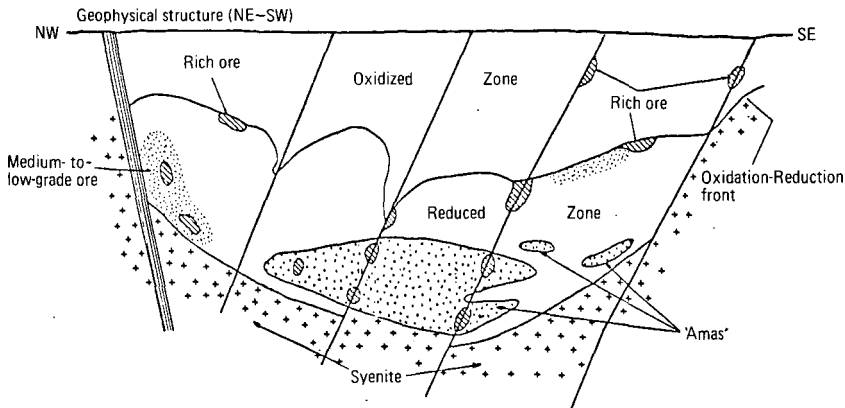


FIG.3. Cross section of the Osamu Utsumi deposit (Poços de Caldas).

The primary mineralization in breccias is connected with the phenomena of pulsations in volcanic chimneys. These phenomena give rise to chimneys where breccias occur with primary mineralizations and to lateral diffusion of the mineralization forming these large masses (clusters) with richer bands along the chimneys, dykes and fractures. It occurs in body B of Cercado, which accounts for about 70% of the deposit. It has essentially the same constituents as the hydrothermal primary mineralization.

The secondary mineralization is connected with the phenomena of leaching and oxidation of the uranium nearer the surface by the infiltration water, transport and redeposition along the oxidation-reduction front. It occurs in body B and in the upper parts of bodies A and B of the Cercado deposit. It can be subdivided into two types: (a) sub-horizontal mineralization connected with the oxidation-reduction front, and (b) mineralization in nodules remaining in zones deeply altered by weathering.

### 2.1.8. Resources

Reasonably assured resources	20 000 t $U_3O_8$
Estimated additional resources	6 800 t $U_3O_8$
Total	<u>26 800 t <math>U_3O_8</math></u>

## 2.2. FIGUEIRA DEPOSIT, PARANA

### 2.2.1. Background

In 1956 coal samples from the collection of the DNPM, Rio de Janeiro, were studied and it was found that a sample from the Rio do Peixe coalfield at

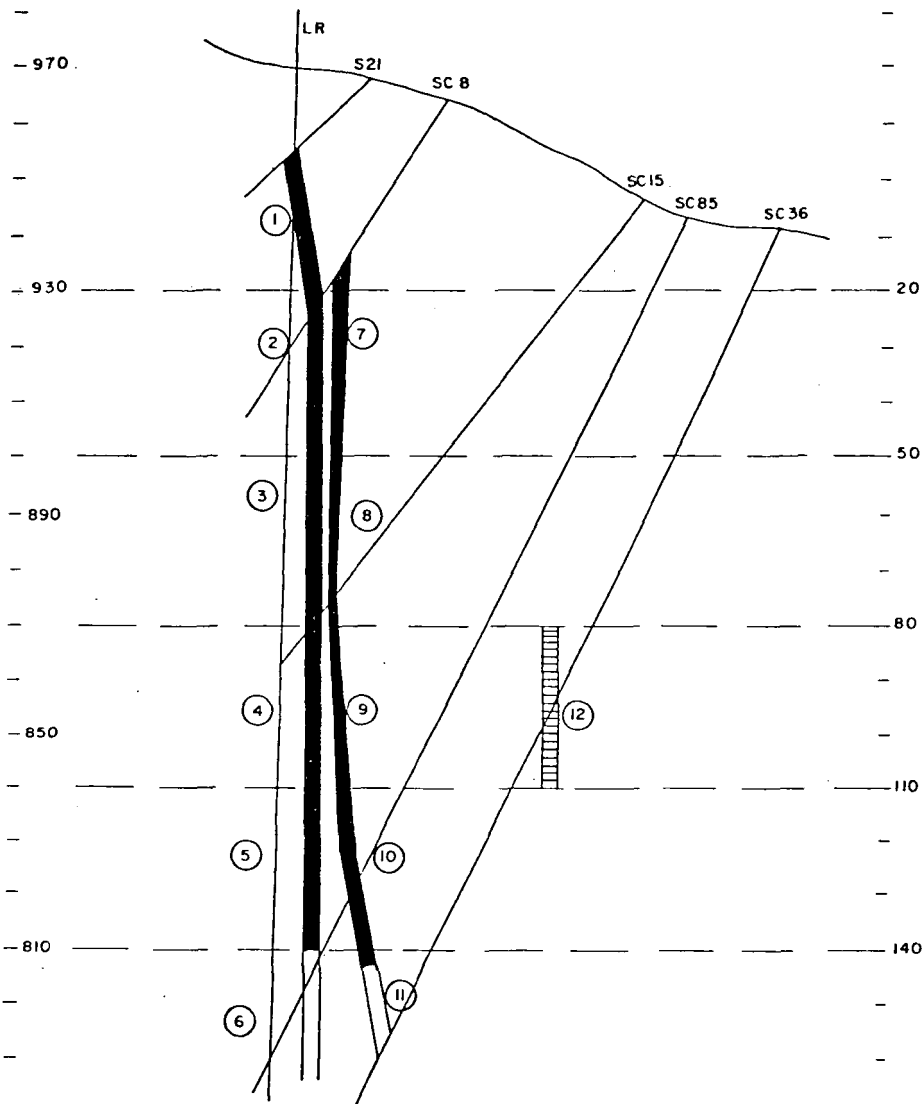


FIG.4. Cross section of the Agostino deposit (Poços de Caldas).

Nova Tôquio in Paraná was radioactive and had a concentration of 300 ppm of  $U_3O_8$ . After geological reconnaissance in the main coal basins in southern Brazil covering the states of São Paulo, Paraná, Santa Catarina and Rio Grande do Sul, the area of Cambuí-Figueira in the Rio do Peixe Basin was selected for detailed studies as it exhibited the highest uranium values.

In 1969 the stratigraphy of the area was studied in detail. The oil wells drilled by PETROBRAS served as the basis for this study, and care was taken to select depositional environments which were favourable to uranium. A systematic *wide-spacing drilling programme* followed and, to the extent that positive results were obtained, the grid spacing was reduced. By integrating the data obtained, CNEN teams were able to identify the mineralization model and estimate the uranium resources in the Figueira as early as 1974.

In 1977 the NUCLEBRAS-DRM carried out a preliminary availability study with a techno-economic analysis for establishing a mining and industrial complex in the Figueira region. The study concluded that the Figueira deposit could meet part of the raw material requirements for the Brazilian nuclear programme. In 1978 underground exploration started with the excavation of a shaft, which is expected to reach the mineralization at a depth of 130 m, and a drift extending over 600 m, which is intended to provide samples for ore-processing assay and also support for planning mining and viability studies.

### 2.2.2. Location (Fig.5)

The Figueira deposit is situated in Curiúra country, Paraná state, at a distance of about 5 km northwest of the village of Figueira.

### 2.2.3. Regional geology

Geologically, the deposit is located on the eastern fringe of the Paraná Basin, represented regionally by sediments deposited between the Carboniferous and the Upper Permian. They comprise the Itararé, Rio Bonito, Palermo, Irati and Serra Alta Formations with beds showing a general  $N20^{\circ}E$  direction and a  $1^{\circ}$  dip to NW and intersected by Cretaceous diabase dykes with a general  $N40^{\circ}W$  direction and sub-vertical dip.

#### *Stratigraphy*

The Itararé Formation in the area has a thickness of 700 m of sediments deposited in fluvial, lacustrine and glacial environments and consists of diamictite, shales, rythmites and sandstones of fine to pebble grain-size. The Rio Bonito Formation is superimposed on the Itararé Formation varying in thickness between 120 and 140 m. This sequence was sub-divided into a basal part of

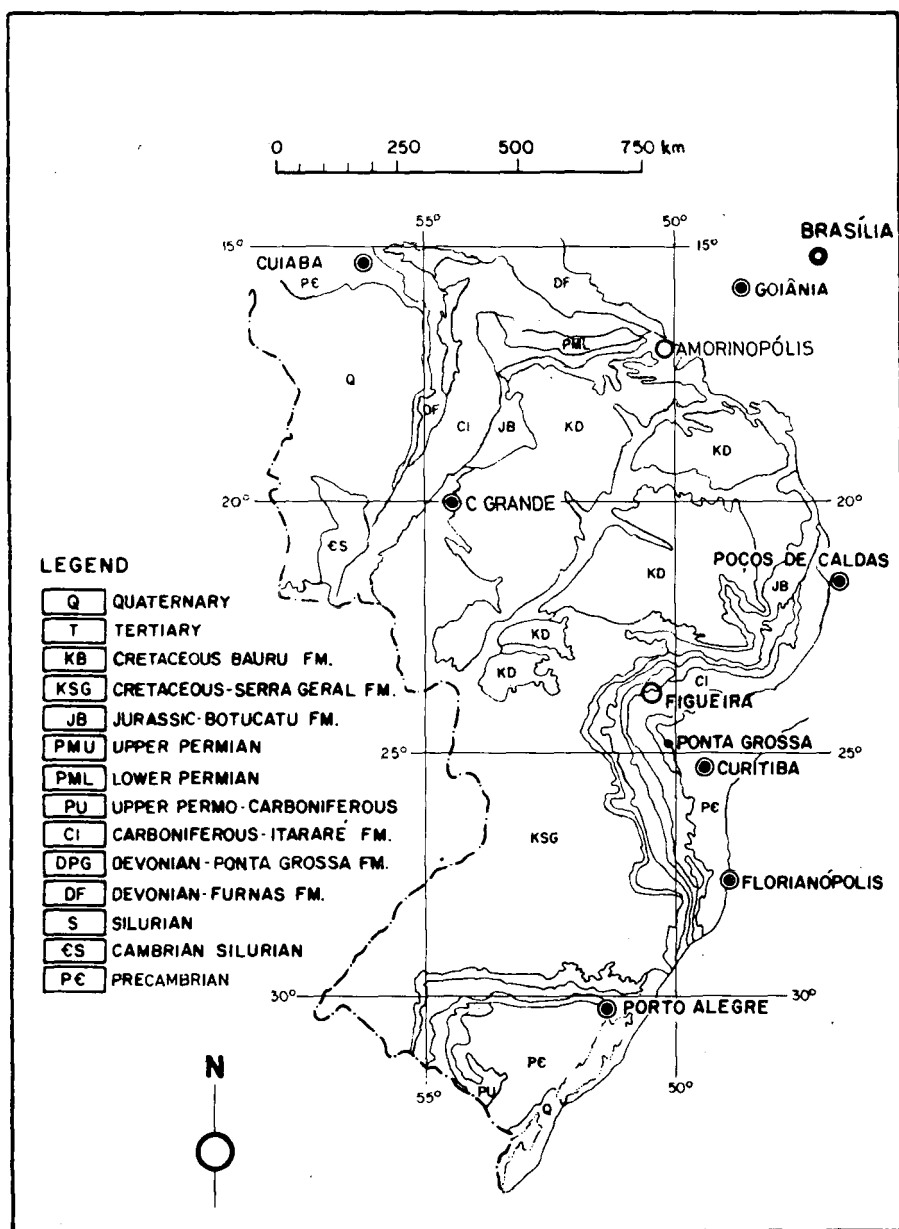


FIG.5. Simplified geological map of the Paraná Basin showing the location of the Figueira area (FM = formation).

the environment of flood plain, river channels and swamp, composed of very fine to conglomerate sandstones with intercalations of arkoses, siltites, coal and black shales with calcareous cement; a middle part, of the probable environment of epineritic sedimentation, composed of siltites intercalated with marls, limestones and fine sandstones with parallel laminations; a top part, of epineritic to littoral environment, with very fine and laminated sandstones with silt intercalations.

The Palermo Formation, attaining a thickness of 80 m, comprises a monotonous succession of laminated siltites, sometimes with plant remains and silex horizons deposited in an infraneritic environment.

The Irati Formation, overlying the Palermo, attains a thickness of 45 m in the area and consists of pyrobituminous shales with parallel laminations and intercalations of limestone and silex deposited in a restricted marine environment.

Lastly, the Serra Alta Formation, having an average thickness of about 85 m and composed of a sequence of shales with indistinct laminations, which was also deposited in a restricted marine environment.

#### 2.2.4. Structural geology

The most pronounced structural feature in the area is the Ponta Grossa arch, a structure of considerable surface expression in the region east of the Paraná, its axis having a general SE-NW direction. This tectonic event began in the Lower Carboniferous and was stabilized probably during the Cretaceous. The arch, which is epeirogenic in nature, exhibited the greatest activity in the Lower Permian affecting mainly the Itararé sediments, and its last rising movements affected the Palermo Formation. The activity of the arch caused tension, giving rise to release fractures parallel to its axis. These fractures were filled with diabase dykes.

#### 2.2.5. Uranium mineralization (Fig.6)

By establishing a reference calcareous horizon at the top of the basal part of the Rio Bonito Formation, it was possible to characterize three stratigraphic units from the top of the Itararé Formation to this horizon. The three units were defined in the following manner:

- (a) Unit A, the sequence between the top of Itararé and a carbonaceous siltite, including coal
- (b) Unit B, the sandy sequence which extends to a siltite below the calcareous horizon
- (c) Unit C comprising siltite and limestone.

The uranium mineralization is located in the sedimentary sequence between the coal seam in unit A and the calcareous horizon in unit C. It is associated with sandstones, carbonaceous siltites and coal seams. In sandstones the uranium mineralization is found in the form of uraninite between the interstices of quartz

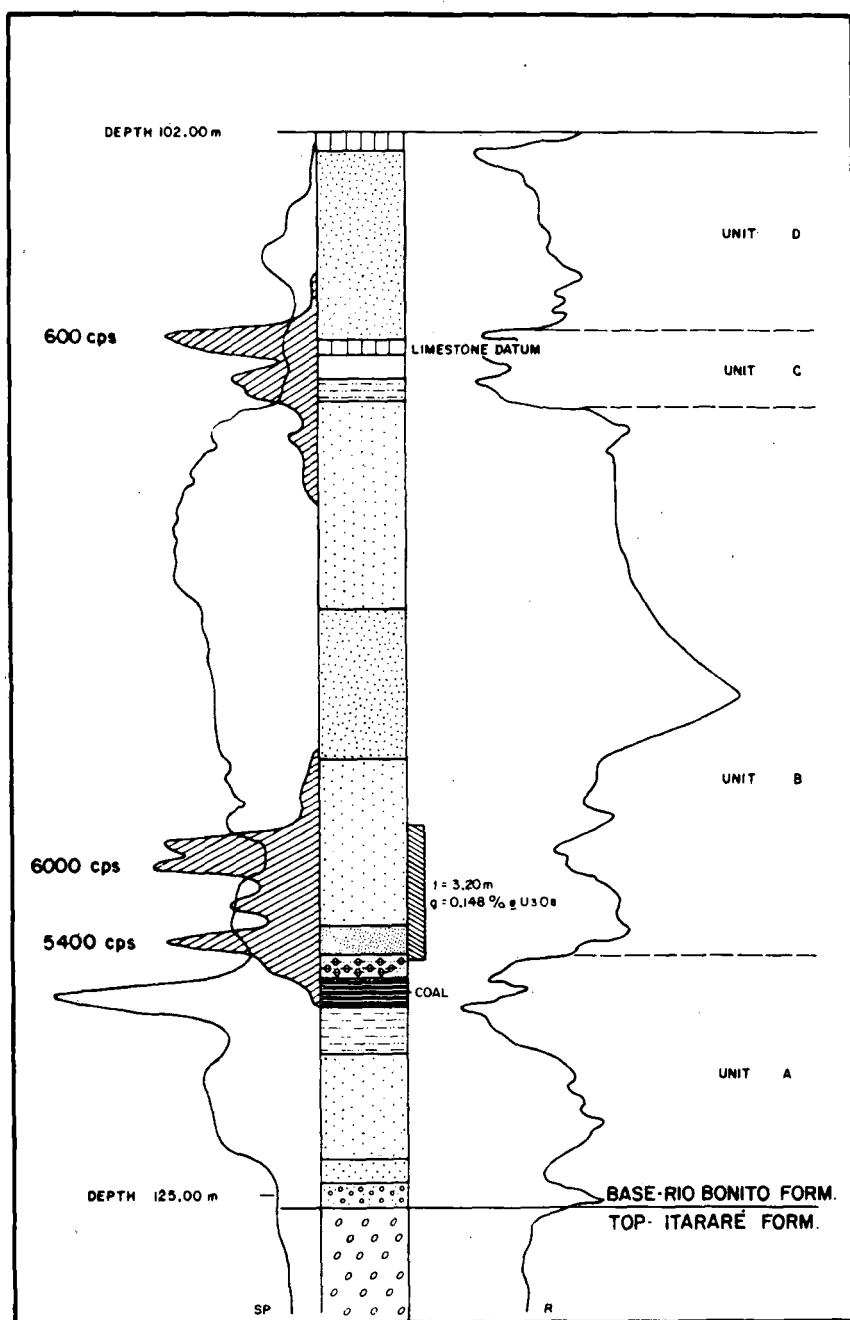


FIG. 6. A typical log of the mineralized zone at the basal part of Rio Bonito Formation showing the lithostratigraphic units (cps = counts per second).

grains cemented by a calcareous cement; in carbonaceous siltites and coal the uranium mineralization occurs in the form of organo-mineral complexes. In the latter case, secondary mineralization can be observed in the form of a complex Ba and U phosphate, uranocircite.

The uranium mineralization is assumed to have occurred in two distinct stages, the first syngenetic, in paludal environments rich in organic matter and, the second, epigenetic located in the zones of old river channels, where sandy sedimentation predominates over pelitic sedimentation. The mineralization can be schematized in the following manner:

- (1) Unit A was deposited in channel zones at the top of Itararé with simultaneous deposition of uranium transported in solution.
- (2) At the end of deposition of unit A, a drainage network would have been established making possible the deposition of sand sediments and shales which constituted unit B. During diagenesis of the sediments uranium would have been subjected to the process of remobilization and precipitation in favourable regions close to the channel zones.
- (3) Levelling of the channels led to a decrease in the supply of clastics and an increase in chemical sedimentation which constituted unit C.
- (4) As unit B was covered by unit C and protected from surface oxidizing agents there would have been an increase in the hydrodynamic flow of the slightly alkaline underground water which would have remobilized uranium from the tetravalent state, transporting it in the hexavalent state to the reducing zones where reprecipitation took place.
- (5) Successive remobilizations and depositions would have occurred until situations characterized by extreme reduction conditions were created, by which time the enrichment in the host rocks would have attained a degree of saturation.

#### 2.2.6. Associated elements

Molybdenum, lead, zinc, copper, arsenic and thorium are the main elements associated with uranium in varied proportions. In addition, Se, V, Ni and Ge appear in trace amounts. Of the above-mentioned elements the most prominent is molybdenum, which occurs in significant proportions. Another noteworthy fact is the high proportion of pyrite and coal found in the mineralized zones.

#### 2.2.7. Resources

Reasonably assured resources	7000 t $U_3O_8$
Estimated additional resources	1000 t $U_3O_8$
Total	<u>8000 t <math>U_3O_8</math></u>

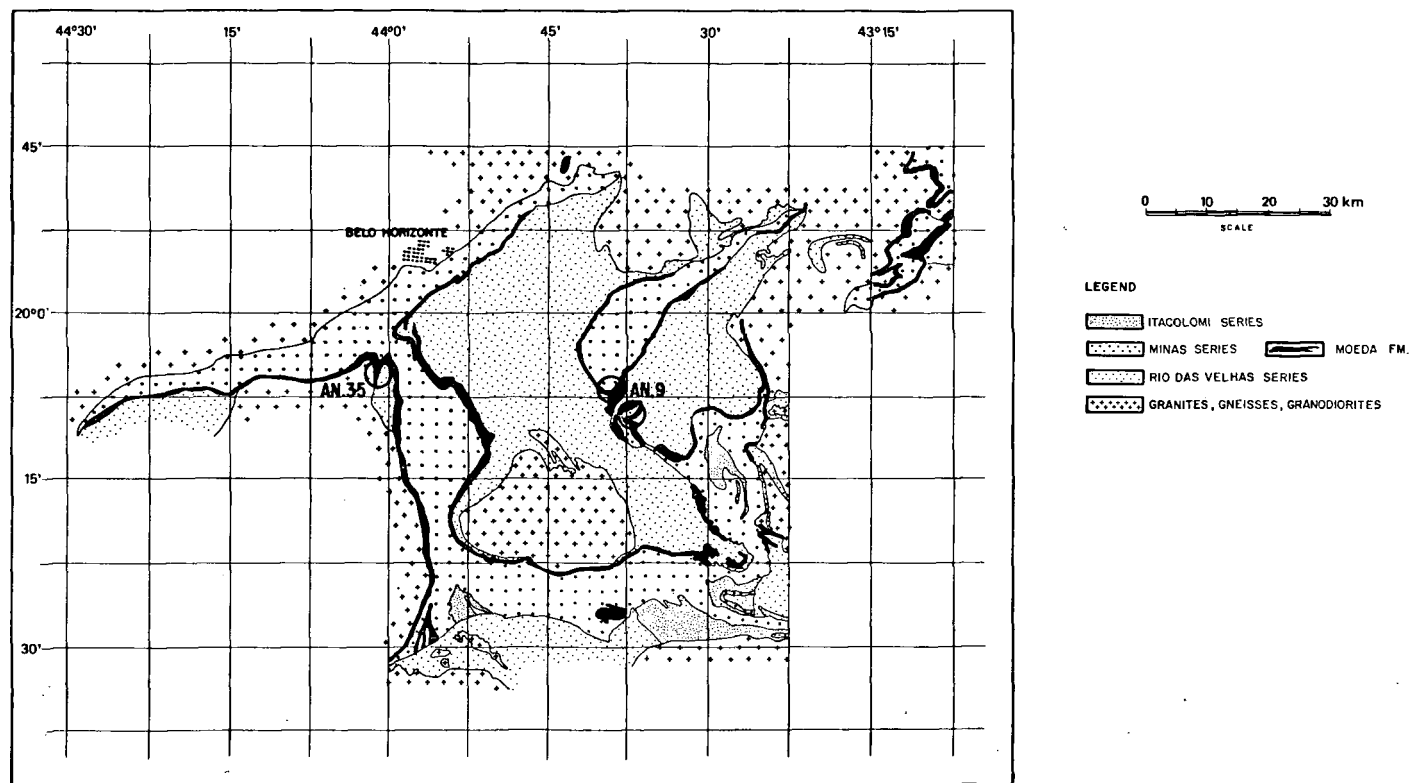


FIG. 7. Simplified geological map of the Quadrilátero Ferrífero area, showing the Moeda Formation and anomalies 9 and 35.

## 2.3. GANDARELA AND SERRA DAS GAIVOTAS DEPOSITS, QUADRILATERO FERRIFERO, MINAS GERAIS

### 2.3.1. Background

In 1959 the Instituto de Pesquisas Radioativas in Belo Horizonte completed the uranium exploration in the Quadrilátero Ferrífero. However, it was from 1970 onwards that the tempo of activities was intensified, when the CNEN geologists identified radiometrically anomalous samples in the rock collection of the Ouro Preto School of Mines Museum, and at the DNPM. One which drew attention was a pyrite conglomerate from Serra da Moeda. This sample had 120 ppm of uranium.

In 1971 regional operations were started with a car-borne radiometric survey making use of most of the existing roads in the Quadrilátero Ferrífero area. This survey revealed 150 radiometric anomalies. Follow-up was done by geological mapping, radiometry in regular grids and by drilling boreholes. The promising areas were found to be Gandarela and Serra das Gaivotas, anomalies 35 and 9 in Fig.7. The delineation of the mineralization and uranium resources was achieved by continuing the detailed exploratory work, i.e. mapping, surveying, drilling.

### 2.3.2. Regional geology

#### *Stratigraphy*

The major stratigraphic units of the Quadrilátero Ferrífero were defined according to Dorr as:

*Rio das Velhas series.* It is composed of a flyschoid sequence at the base and a molasse sequence at the top, and represents the older metasedimentary rocks of the area which are probably more than 2300 million years (m.y.) old. Also found are chlorite schists, phyllites, metavolcanics, graywackes, dolomites, ankerite schists, quartzites and conglomerates from the Nova Lima, Maquiné and Tamanduá groups.

*Minas series.* It consists of stable platform and flyschoid sediments at the top and lies discordantly over the older rocks of the Nova Lima series. This series is represented by three distinct groups:

- (a) Caraca group: consists of conglomerates, quartzites and phyllites;  
typical sediment of a reducing environment
- (b) Itabira group: consists of chemical and fine detritic sediments and is  
characterized by large deposits of iron, manganese  
and carbonates; oxidizing atmosphere environment
- (c) Piracicaba group: constituted by phyllites, quartzites and dolomitic  
phyllites and represents the top of the Minas series.

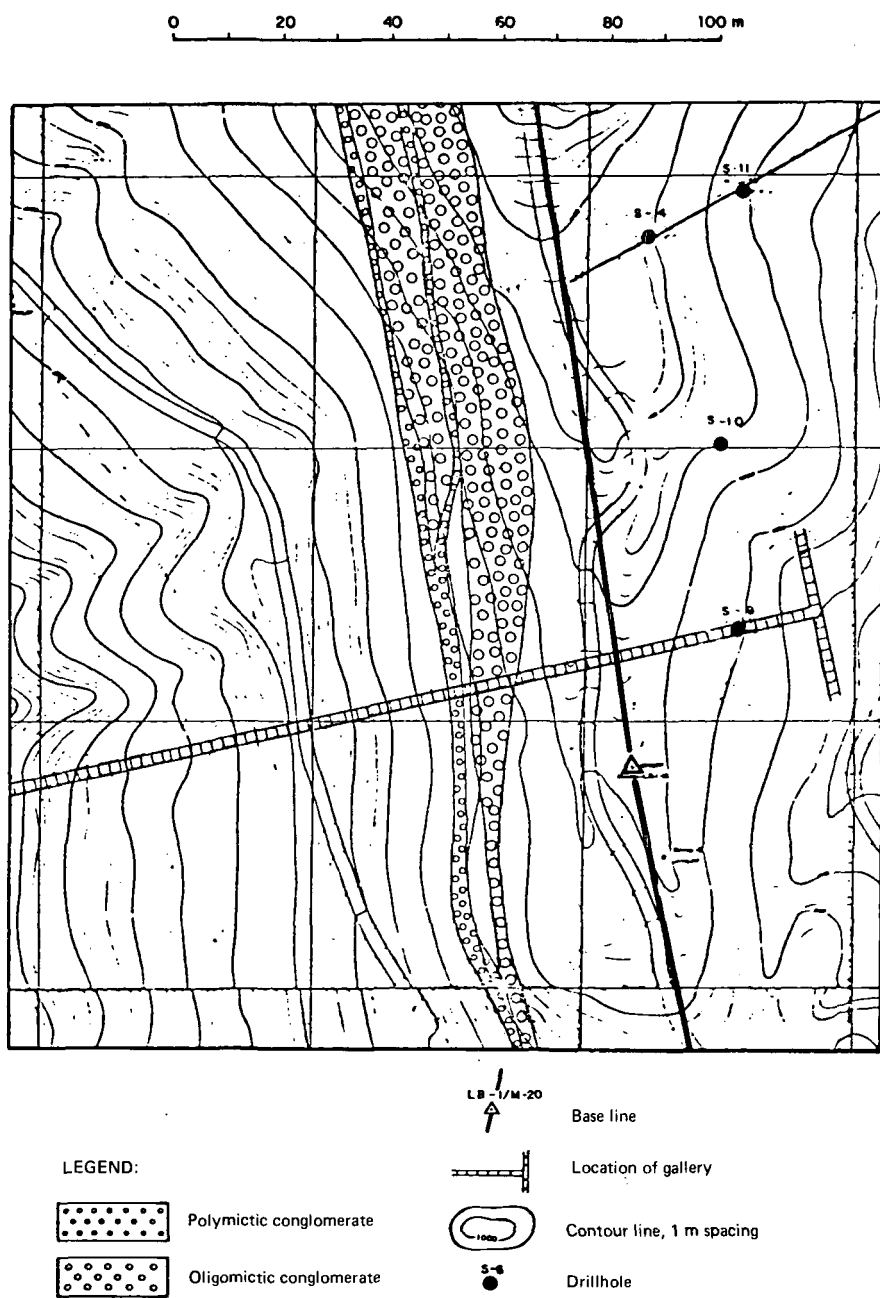


FIG.8. Geological sketch of the Serra das Gaivotas deposit (Minas Gerais).

### 2.3.3. Serra das Gaivotas

The area is situated at Serra das Gaivotas, 30 km southwest of Belo Horizonte, in the Casa Branca district. Access is by 15 km of asphalt road (BR-40: Rio-Belo Horizonte) and another 15 km of gravel road.

The Moeda syncline, where Serra das Gaivotas is located, is a structure of north-south alignment with inversion of beds on the eastern fringe and normal dip to the west (Fig.8). It occupies the western part of the Quadrilátero Ferrífero.

To the west of the syncline, the Serra das Gaivotas is composed of meta-sediments of the Caraca and Itabira groups, with no Gandarela Formation or metasediments of the Piracicaba group, the upper layer of the Minas series. The metasediments of the Caraca group are represented by quartzites and conglomerates of the Moeda Formation and phyllites of the Batatal Formation, constituting the upper unit; they occur only in the extreme north of the area and are in normal contact. The lower contact of this group is discordant with granite-gneissic rocks almost throughout its extension except the southern extremity of Serra das Gaivotas where the Moeda Formation is underlain by schists of the Nova Lima group of the Rio das Velhas series.

To the east the Caraca group underlies metamorphic rocks of the Itabira and Nova Lima groups through thrust fault contact in an approximately north-south direction.

Two fault systems predominate in the area, intersecting the quartzites of the Moeda Formation. The first system is represented by thrust faults in a general north-south direction. The other identifiable fault system exhibits planes with an average N70°W direction and is represented by tear faults.

The basement is composed of granite gneiss rocks cataclased in the contact zones.

The Rio das Velhas series is represented by the undivided Nova Lima group composed of schists, chlorite schists and metavolcanics, which are the oldest metasediments of the area with a probable age of more than 2300 million years. The Minas series is constituted by stable platform sediments and represented in the area by metasediments of the lower and middle layers — the Caraca and Itabira groups — the latter represented only by the Itabira rocks of the Caué Formation.

Of economic importance are the oligomictic metaconglomerates from the basal section of the Moeda Formation which show uranium mineralization, especially the horizons connected with a palaeodrainage of approximately N45°E direction. The conglomerate pebbles are almost all quartz, rarely quartzite. It is a relatively immature conglomerate with an abundant quartz sericite matrix of light green colour, generally quite pyritic with mineralization of uraninite and pitchblende. The presence of monazite, zircon, thucholite, coffinite, pyrrhotite, chalcopyrite and rutile is also confirmed.

Subsequent concentrations and remobilizations could have been responsible for the epigenetic secondary uraninite.

Various analyses demonstrated that for all practical purposes, there was no gold in the oligomictic conglomerates of the area.

In some areas the sericitic pyritic matrix shows at least three types of pyrite: one finely distributed in the matrix, generally with uranium; another, in large masses of the pebble type, rounded oval in shape, occurring mainly in association with gold and secondarily with uranium; and a third being well-crystallized idiomorphic pyrite having no direct relation with the mineralization. It is assumed that there is a relationship between the pyrite, possibly of detritic origin, and the mineralization. Subsequent reconcentrations and remobilizations could have taken place, and this could explain the existence of the epigenetic secondary uraninite.

The unit accumulating uranium occurs throughout the syncline and its facies characteristics on the eastern fringe are different from those on the western fringe. On the eastern fringe it was deposited in an environment of higher current competence; towards the west, this competence decreases. Thus, to the east, the channels are of small width with evidence of good reworking of the conglomerates. The western fringe exhibits a smaller quantity of conglomerates, indicating that drainages already attained, or were close to attaining, their equilibrium profile. In this region thin carbonaceous beds favourable for uranium deposition could have developed.

Mineralogical studies indicated that the black nodules with high radioactivity values found in the pyrite matrix are composed mainly of uraninite, although some pitchblende may be present. The radioactivity is due to the presence of uranium minerals similar to thucholite contained in amorphous hydrocarbons. The minimum value of the  $\text{ThO}_2/\text{U}_3\text{O}_8$  ratio was 0.11 and the maximum 1.15, the average being about 0.46.

Weathering was responsible for the leaching of the uranium minerals from more shallow horizons, where only some secondary minerals, mainly torbernite and meta-torbernite, could be found. At deeper levels where the effect of leaching was less, concentrations of primary minerals, mainly uraninite, are encountered.

#### 2.3.4. Gandarela syncline

The area under study is situated about 65 km southeast of Belo Horizonte; as far as Rio Acima there are 35 km of asphalt road, then 20 km of well-maintained unpaved road and finally 10 km of secondary roads.

The Gandarela syncline structure has been mapped. It is located in the central part of the Quadrilátero Ferrífero, where the thrusts were in the east-west direction. Tear faults, in the perpendicular direction, are abundant, with variable displacements and angles. The eastern fringe of the syncline has the largest surface expression.

The sedimentation in the Gandarela syncline is typically fluvial with palaeocurrent directions from north-east to south-west. The pre-Moeda palaeo-surface shows local depressions, with the difference in levels exceeding 100 m, in concordance with zones of higher current competence at the base of this formation, which are attributed to the more pronounced erosion of the Nova Lima group in areas close to sediment entry points.

The Moeda Formation varies in thickness from 320 m to 15 m. This formation exhibits cyclic sedimentation with decreasing granulometry towards the top in the sequence as a whole, and in each cycle in particular. Thus, lenses of conglomerates and quartzites alternate, the former generally showing a positive relief in relation to the latter. The contact with the Batatal Formation is frequently gradational with alternation of quartzites and phyllites along a thickness of 5 m. Locally the contact can be abrupt.

The conglomerates are oligomictic with almost absolute predominance of light to dark quartz pebbles; there are, however, local occurrences of quartzite and schist pebbles. The granulometric variations of the conglomerates show a tendency to decrease from east to west and from north to south. On average, the pebbles are much more coarse in the north, suggesting a palaeodrainage tendency with flow from north to south. In other areas the cross-stratification indicates an east-to-west direction.

### 2.3.5. Resources

Reasonably assured resources	5 000 t $U_3O_8$
Estimated additional resources	10 000 t $U_3O_8$
Total	<u>15 000 t <math>U_3O_8</math></u>

## 2.4. AMORINOPOLIS DEPOSIT, GOIAS

### 2.4.1. Background

The first reference to uranium in the area goes back to 1969 when a significant concentration was noted in granites of the region. In 1973 the aerial geophysical survey carried out by PROSPEC for the DNPM revealed more than a hundred radioactive anomalies in sedimentary and basement rocks. These anomalies were checked on the ground and appeared as laterite covers, which are quite common in the Brazilian sedimentary basins. Such anomalies were considered to be of little interest at that time. It was only in 1975 that, in view of the large extension of laterite covers, NUCLEBRAS decided to explore them. Excavation of shafts and trenches with systematic sampling confirmed uranium mineralization in sandstone and shale horizons of a thickness of up to 6 m under a thin laterite cover. The exploration activities were intensified in 1976 and an

aerial geophysical survey with closer line spacing (500 m) was carried out in the area.

After the targets had been selected and mapped a drilling programme was started in order to delineate and evaluate the resources of ore bodies and to characterize the Amarinópolis deposit. In the course of these operations uraninite and coffinite were identified for the first time and it was confirmed that the mineralization was of the 'roll front' type similar to the sedimentary deposits of Colorado and Wyoming (United States of America).

Of the 31 anomalies found in the Iporá Amarinópolis area, several have been evaluated so far. In view of the resources estimated for six different ore bodies evaluated to date, it was decided to carry out studies on the economic viability for establishing a pilot plant for production of uranium concentrate. These studies are now underway.

#### 2.4.2. Location (Fig.5)

The Amarinópolis deposit is located in the Amarinópolis and Iporá counties in Goiás state at a distance of 15 km NNW from the town of Iporá, which is 215 km west of Goiânia and is served by a paved road.

#### 2.4.3. Regional geology

##### *Stratigraphy*

The stratigraphy is as follows:

*Precambrian:* The lithostratigraphic units belonging to the Paraná Basin, which crop out in the area, lie discordantly on Precambrian rocks—granites, gneisses of the basement complex and schists of the Araxá group.

*Devonian:* Corresponds to two formations, Furnas and Ponta Grossa.

(1) **Furnas Formation:** The sediments of the Furnas Formation are composed predominantly of sandstones with sub-rounded quartz grains, conglomerate layers and intercalations of fairly kaolinic silt lenses. They show plane-parallel and grooved cross-stratifications. The thickness of the Furnas Formation in the Iporá-Amarinópolis area is small as a consequence of the Precambrian structural highs where it was deposited. The thickness ranges from 1 to 30 m; however, its occurrence persists throughout the area. The deposition environment is considered to be shallow marine by some and anastomosed fluvial by others.

(2) Ponta Grossa Formation: In this region the Ponta Grossa Formation shows considerable variation in facies from the standard section. Coarse clastics predominate, especially beds of arkosic conglomerate sandstones in the form of blankets with accentuated uranium mineralization.

On the basis of the correlation between the geological profiles and the stratigraphic information from the shallow drilling with two oil wells drilled by PETROBRAS (Agst-I-MT and Jast-1-GO), it was possible to sub-divide the Ponta Grossa Formation into three members:

- (a) The lower member, discordant with the Furnas Formation, begins as a conglomerate superposed on a sequence of fine sandstone siltite and shale with beds of uraniferous arkosic conglomeratic sandstones. Its thickness varies between 40 and 80 m. This member overlaps the Furnas Formation and lies directly on the Precambrian in the region east of the area.
- (b) The middle member is characterized by the predominance of coarse sandstones and occasional submarine channels. It has a thickness of about 140 m. It occurs by progradation over the lower member and directly over the Precambrian.
- (c) The upper member consists of black shales and discordantly underlies diamictites of the Aquidauana Formation; only 45 m of sediments have remained following the erosion that occurred after deposition of the Devonian.

Computing the thicknesses of the three members, we can assume that the Ponta Grossa Formation has retained a thickness of 210 m after erosion in the area south of Amarinópolis. The deposition environment of the Ponta Grossa Formation, as a whole, can be regarded as marine and epineritic in the lower and middle members and deeper marine in the upper member shales.

*Carboniferous:* The Aquidauana Formation is composed of red sub-rounded quartzose sandstone of fine to coarse granularity showing predominantly grooved cross-stratification, shales and diamictites deposited discordantly over the erosion surface of the Ponta Grossa Formation. It occurs to the southeast of the town of Iporá and to the south of the town of Amarinópolis, with a maximum thickness of about 120 m. The sediments of this group were considered to be of glacial origin.

*Cretaceous:* The Bauru Formation outcrops in the area to the southwest of the town of Amarinópolis, and is composed of coarse sandstones, conglomerates and silex. The thickness is about 100 m.

*Tertiary:* The Cachoeirinha Formation is represented by partially consolidated and fairly limonitized sandy clay sediments superposed discordantly on the Aquidauana Formation and has a thickness of about 5 to 10 m.

*Alkaline intrusive rocks:* They are defined as belonging to the Iporá group, of alkaline origin, and intrusive in the basement complex and in the Devonian. The most noteworthy feature of this group in the area is the Morro dos Macacos with an area of about 25 km<sup>2</sup>. According to the Institute of Geochronology, University of São Paulo, these alkaline rocks are of Cretaceous age (70 m.y.).

Lithologically, the Iporá group consists of an enormous variety of alkaline rocks, ranging from acidic ones such as alaskites and nordmarkites, through intermediate types like syenites, to ultrabasic types like pyroxenites, peridotites and dunites. The intrusions of the alkaline bodies are circular or in the form of sills and dykes intersecting the Palaeozoic and Precambrian units.

### *Tectonics*

The Iporá-Amorinópolis area where the uranium mineralization occurs is located in the so-called Amorinópolis horst. The area was subjected to tectonic movement of tensile nature which caused gravity faults and injection of alkaline materials. These faults have a NW and NE direction and maximum displacements reaching 250 m.

#### **2.4.4. Uranium mineralization**

##### *Type of mineralization*

The uranium mineralization of the Amorinópolis deposit is of two types, a primary one with uranium of valency +4, and a secondary one with uranium of valency +6. The primary mineralization is composed of dark minerals, pitchblende (uraninite) and coffinite. The secondary one consists mainly of autunite and sabugalite, which are alteration products of the primary mineralizations. The primary mineralization is related only to the degree of oxidation without genetic implications of endogenous origin. The uraninite-coffinite association is very common in sedimentary uranium deposits like those of the Colorado plateau or of Wyoming in the United States of America. The best example of primary mineralization is found at anomaly 12, which clearly shows the 'roll-front' model.

##### *Mineralization model*

The geochemical cell model seems to be the most appropriate for the Amorinópolis deposit. Other types of deposit in the area are derived from this

model. The secondary mineralization represents alteration of the primary deposit in the zone of influence of the water table; in this case, the 'roll-front' geometry is obliterated and there are secondary disseminations. With the severity of alteration, part of the uranium is leached out and part is absorbed by iron hydroxides forming mineralizations in ferruginous laterites. The 'roll-front' geometry is not always evident even when primary minerals are found, as is the case with anomaly An-23/24, but the oxidation-reducing phenomenon is well-defined. As the mineralization is controlled by hydrodynamic flow, it is subjected to changes of continuity when it encounters obstacles like faults and dykes. In these cases, deposits are formed along or near the planes of weakness, as is found in some prospects in the Iporá-Amorinópolis area.

### *Control of mineralization*

The uranium mineralization in the Amorinópolis deposit is controlled essentially by the physico-chemical conditions of the host arkosic sandstone and the hydrodynamic flow of the solutions. The lithostratigraphic control of the mineralization is defined in terms of favourability of arkose when the lower and upper levels are pelites or very fine sandstones. Another important control is tectonic. Faults, dykes and sills are structures controlling the direction of the hydrodynamic flow responsible for the transport of mineralizing solutions.

#### 2.4.5. Resources

Reasonably assured resources	2000 t U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Estimated additional resources	3000 t U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Total	<u>5000 t U<sub>3</sub>O<sub>8</sub></u>

## 2.5. CAMPOS BELOS – RIO PRETO DEPOSIT, GOIAS

### 2.5.1. Background

In 1971 the CNEN carried out the first radiogeological reconnaissance programme in the Campos Belos-Rio Preto region. There are outcrops of rocks of the basement complex: the Araxá group and the Araí group, both belonging to the Precambrian, the Bambuí group of the Eocambrian, and the Areado and the Serra Negra Formations of the Cretaceous. Several anomalies were inspected and confirmed which led to a geological and radiometric survey over 850 ha (1 ha =  $1.00 \times 10^4$  m<sup>2</sup>). Diamond drilling and waggon-drill drilling were also carried out as follow-up.

### 2.5.2. Location

The area covered by the Campos Belos/Cavalcante exploration programme is 35 km to the northeast of Brasília.

### 2.5.3. Work performed

Firstly, an aerial gamma-ray spectrometric survey was performed over an area of 45 200 km<sup>2</sup>. The detected anomalies were identified in the field and studied, the number of anomalies identified in the basement complex and the Araxá group being 78. Some of these were selected for further work. Drilling was carried out in 1974 for the purpose of exploring the quartzites and possible basal and intraformational metaconglomerates of the Arraías Formation. Shafts and trenches excavated in the anomalies showed the existence of sheared bands with the occurrence of boudinage structures, and it was clear that the mineralization persisted at depth. This was investigated by a core drilling programme. Detailed geological mapping on the 1:500 scale of 45 anomalies over an area of 500 ha in the Campos Belos and Rio Preto regions in 1976 established that nearly all the indications of uranium were related to cataclasites of the basement complex or to cataclastic schists of the Araxá group.

### 2.5.4. Regional geology

In this area occur the lithostratigraphic units of the basement complex, the schist unit, the Araí group consisting of Arraías and Traíras Formations, and the Bambuí group. The basement complex is composed mainly of well-foliated biotite-gneisses of medium grain-size, amphibolites, cataclasites, migmatites (metatexites and diatexites) and granites. There are prominent intrusive granite bodies aligned along a large strike-slip fault in the NE-SW direction. Many of these granites are greisenized and mineralized in cassiterite.

The schist unit is the name given to the sequence of locally graphitic and altered mica schists which underlie the quartzites of the Arraías Formation. There are doubts about the correlation of this unit with the schists of the Araxá group and those of the Cachoeira das Eguas Formation. This unit is represented mainly by graphitic or non-graphitic quartz mica schists containing intercalations of graphitic leucogneisses at the base.

The Araí group is composed of Arraías and Traíras Formations. The Arraías Formation consists predominantly of quartzites of fine to medium granularity with intercalations of metapelites, differentiated metaeffusives and discontinuous levels of interformational metaconglomerates. The Traíras Formation predominantly comprises metasiltites, phyllites and quartzites with intercalations of impure limestones.

The Bambuí group is represented by its middle layer (Paraopeba Formation) composed of marls and, secondarily, limestones, shales, siltites and slates. It lies discordantly over the basement complex and, rarely, over the psammities of the Araí group.

Tectonically, the area was affected by at least two events. The principal structures have a NE-SW direction; they are younger and dislocate those of the NW-SE direction. In the regional context the schist series appears as folded in a synclinorium-anticlinorium sequence with a slight inclination towards SE.

### 2.5.5. Uranium mineralization

The uranium mineralizations are associated with quartz veins, filling vertical fractures, which intersect the schist unit, in the pressure release and shear zone. So far only secondary mineralization of autunite and/or torbenite associated with fractures has been established. In the Campos Belos region drilling showed that this mineralization persisted to the depth of 70 m.

### 2.5.6. Resources

The Campos Belos-Cavalcante-Rio Preto region evidently has a large uranium potential. However, because of rather complex factors, it will be expensive in terms of time and money to define the geological context. The uranium resources have so far been estimated only for Anomaly 2 and it amounts to about 1000 t of  $U_3O_8$ .

Reasonably assured resources	500 t $U_3O_8$
Estimated additional resources	<u>500 t <math>U_3O_8</math></u>
Total	<u>1000 t <math>U_3O_8</math></u>

## 2.6. ITATAIA DEPOSIT, CEARA

### 2.6.1. Background

In the earlier days of NUCLEBRAS-DRM, a car-borne radiogeological survey was carried out in the central and northern regions of Ceará (July to October 1975). During this period 11 167 km of roads and trails were covered disclosing as a result 273 radiometric anomalies. Of these, 12 were selected for detailed work on the basis of geological factors, uranium concentrations and the geometry of the anomalous area.

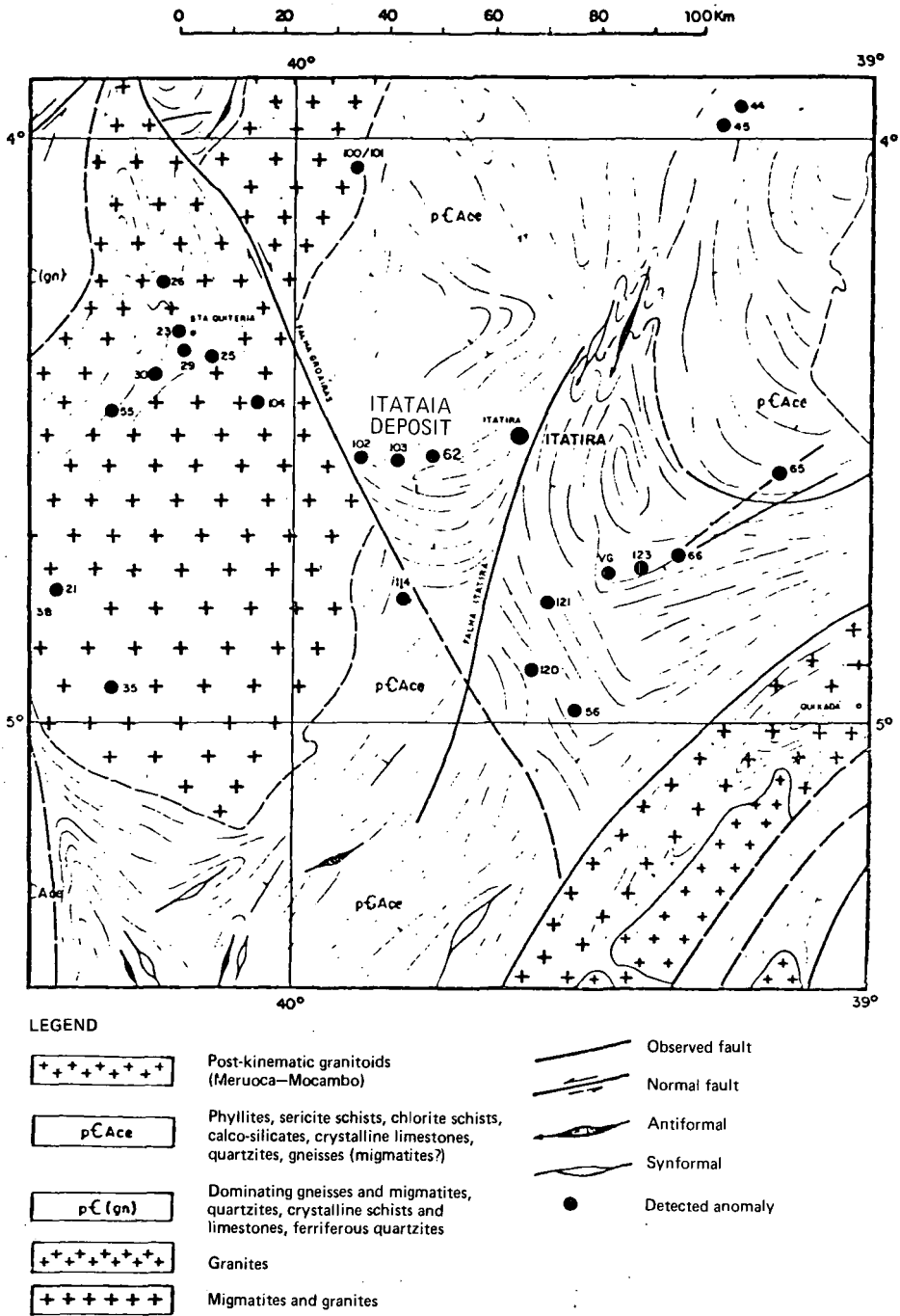


FIG.9. Regional geology – Itaitia deposit (Ceará).

In the course of these studies, in June 1976, NUCLEBRAS geologists discovered in the Itaitaia anomaly an extensive concentration of blocks of phosphate-uraniferous rocks (collophanite) with uranium concentrations of up to 2000 ppm of  $U_3O_8$  and 37% of  $P_2O_5$ . At this site a number of detailed operations such as topographic and radiometric surveys, and geological mapping on the 1:100 scale, were carried out systematically, plus excavation of shafts and trenches, mainly to gain additional knowledge on the geological control of the mineralized zone (2 km<sup>2</sup>). Thereafter, a drilling programme was carried out (1977–1978) to explore the ore in the sub-surface. Because of the excellent results obtained with the boreholes, the activities were intensified. At present efforts are being concentrated mainly on a 2 km<sup>2</sup> area at the Itaitaia farm where drilling and logging are being done to better define the geological parameters and resources.

### 2.6.2. Location

The Itaitaia deposit is located in Santa Quitéria county in the central region of Ceará state at a distance of 45 km southeast of the county headquarters and 15 km WSW from the town of Itaitaia.

### 2.6.3. Regional geology (Fig.9)

The central region of Ceará state includes a portion of the continental crust of the Brazilian Shield where the predominant lithologies are related mainly to regional metamorphic processes in which gneissic and migmatitic rocks dominate almost absolutely. The Precambrian terrains extend over most of the area and consist of metamorphic rocks from metapelites of greenschist facies to migmatites, including granitic culminations, with widely scattered transitory representations. It comprises the following lithostratigraphic units:

- (a) Caicó complex: This unit has the greatest geographic distribution and is the most important in terms of mineralization as it encloses most of the occurrences known so far. It is composed mainly of diversified gneisses with lenticular intercalations of meta-arkoses, amphibolites, quartzites and crystalline limestones, apart from migmatites of different structures.
- (b) Granular plutonic rocks: This unit comprises masses of rocks with textural characters inherent in, or similar to, igneous rocks formed at deep levels of the crust.
- (c) Tamboril/Santa Quitéria complex: It consists of highly migmatized rocks with granitoid cores. Tectonically, this unit is characterized by having a 'granite gneiss dome' structure with fairly homogenized lithologies.

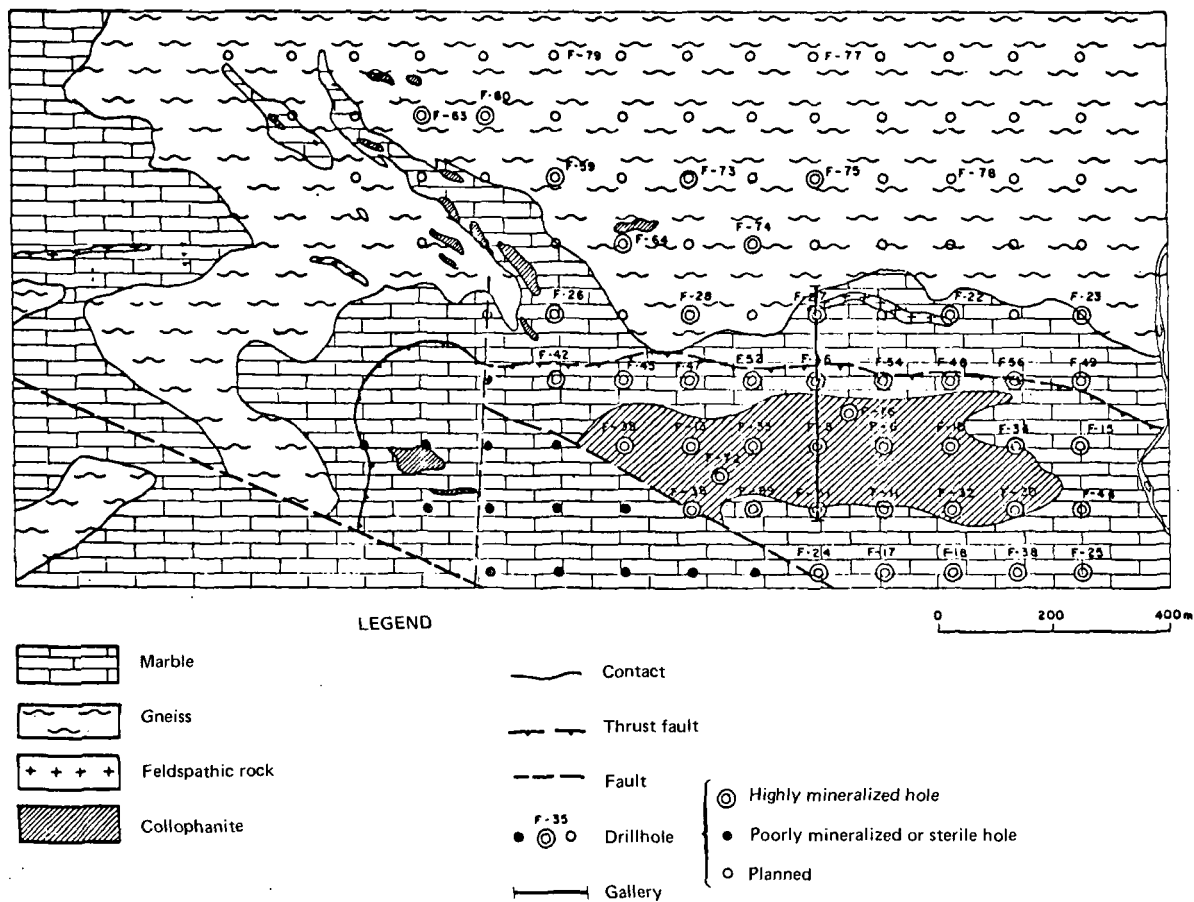


FIG.10. Geological map and drilling grid – Itaita deposit (Ceará).

- (d) *Independencia complex*: It consists basically of a parametamorphic sequence represented by an association of gneisses rich in biotite or hornblende, or both, with intercalations of meta-arkose beds and crystalline limestone lenses.
- (e) *Ceará group*: It is represented by a sequence of ectinitic, parametamorphic rocks generally constituting synclinal zones having quartzites at the base, followed by gneisses, schists, phyllites and carbonate rocks on top.
- (f) *Acidic dykes*: They comprise vein-type rocks of acidic to hyperacidic character, such as veins of silica, vein-type granites and pegmatites.

Apart from these Precambrian units, there occur on a lesser scale Cenozoic rocks represented by alluvia, typical colluvial-eluvial covers of immature sediments and diabase dykes probably related to the basic fissure-type volcanism of the Rio Grande do Norte of Tertiary age.

#### *Local geology (Fig.10)*

The Itaia deposit occurs in Precambrian metasedimentary rocks, more specifically in the lithostratigraphic unit defined as the Caicó complex. The outcrops are mainly of biotite-gneisses and marbles intersected by irregular bodies of pegmatites and vacuolar feldspathic rocks (episyenites). Gneisses are the predominant rocks and show well-developed tectonic foliation, the most common being the banded and lenticular types. Petrographically they are composed of quartz, plagioclase (oligoclase and andesine), locally rich in garnet and sometimes containing chlorite, sillimanite and diopside.

Marbles from lenticular bodies intercalated in gneisses. They are pure calcareous saccharoidal, sometimes laminated with layers of graphite or phlogopite or both, sometimes impure, rich in diopside, amphibole and sillimanite. Calcsilicate rocks generally occur in association with marbles and are derived from the regional metamorphism of these impure limestones. Their constituents are diopside, calcite and plagioclase and they have sericite, tremolite, calcite, chlorite and riebeckite as secondary minerals. The pegmatites are granitic in composition and are of the homogeneous type composed almost exclusively of quartz and feldspar and rarely contain scattered muscovite and biotite. The vacuolar feldspathic rocks occur in the form of intercalated lenticular bodies in gneisses and in marbles. They are composed almost entirely of albite, with chlorite and apatite in smaller proportions. They are pink in colour and their texture is medium hypidiomorphic-granular to pegmatoid of vacuolar aspect.

#### *Tectonics*

Structurally, the region fits into the model of mobile belts, being divided into blocks by strike-slip faults of regmagenic mode. The behaviour of these

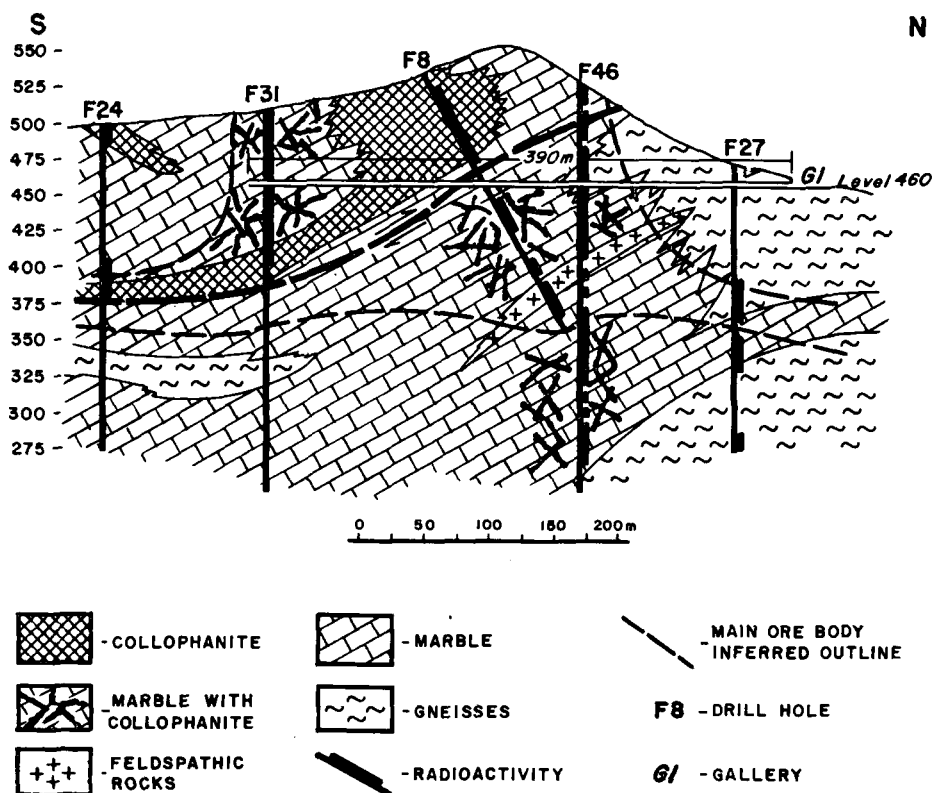


FIG.11. Cross section of the Itataia deposit (Ceará).

blocks is not independent and, regionally, a complex system of folding is delineated, the folds being dependent on the degree of metamorphism attained by the rocks rather than on their mineralogical nature.

The area of the Itataia deposit was affected by at least three successive tectonic movements. The first is characterized by gentle folds, giving rise to antiforms and synforms, with nearly vertical axial surfaces. The second is characterized by thrust faults with south to north direction and, locally, small recumbent folds. The third style is indicated by a  $N70^{\circ}W$  fault, probably a strike-slip fault, with subsequent reactivations. Almost all the rocks show evidences of cataclasis. The mineralization of collophanite must have occurred after the second tectonic phase since there are fractures through the recumbent microfolds filled with collophanite.

#### 2.6.4. Mineralization (Fig.11)

The uranium mineralization of the Itataia deposit is associated with apatite or collophane. Typical apatite occurs in generally idiomorphic millimetre crystals, filling fractures and pores of feldspathic rocks (episyenites), gneisses, marbles and calco-silicate rocks or even in breccias. Even collophane or apatite of the second generation do not always show definite crystalline forms; in some cases, however, they are botryoidal and can occur, filling pores, fractures of rocks and breccia zones and also large-size cavities in marbles. In the last case, the uraniferous calcium phosphate is of massive aspect. Minerals most frequently associated with the phosphates are calcite quartz and chalcedony.

Two main types of mineralization were confirmed in the area:

- (a) Massive collophanite filling cavities in limestone
- (b) Collophanite disseminated in marble, vacuolar feldspathic rock and gneisses (impregnation).

The mineralization of collophanite intercalated with marble is restricted to a limited area, in the form of a lens in sub-vertical position to a known maximum depth of 100 m, while that of collophanite disseminated in feldspathic rocks, marble and gneisses (impregnation) is more irregular and apparently does not form continuous layers.

#### 2.6.5. Genetic aspects

The geological and mineralogical characteristics of the Itataia deposit suggest that it may represent the apex of a geothermal structure associated with a system of convection in which the megafabric could have been conditioned by granitic pluton employed at depth. During emplacement this granite body encountered conditions favourable for generating a hydrothermal system in rocks already having a high porosity because of the regional tectonic stresses prior to its emplacement. The intrusion itself contributed to increasing this porosity by intense hydraulic fracturing even during the mineralization phases. The development of the mineralization processes can be divided into at least four distinct phases:

- (1) Intrusion of probably late orogenic granite bodies with a high basic concentration of uranium (30 ppm on average) and normal concentration of  $P_2O_5$  along stress release zones associated with large regional faults.
- (2) Intense late magmatic activities of deuteric character, which is a general feature of several contemporary granite subdomains. Development of episyenites by processes of desilicification, albitization, chloritization and apatitization; albititization, analcitization and chloritization in gneisses which react with greenschist facies. Early phase of uranium deposition associated with apatite and zircon in episyenites (average 750 ppm of  $U_3O_8$  and 7.5% of  $P_2O_5$ ).

- (3) Deformations on a local scale superimposed on all lithologies.
- (4) Late phase characterized by intense deposition of collophane impregnating all pre-existing lithologies which have been made permeable by the preceding phenomena; filling of voids and hydrothermal substitution in carbonate rocks and in episyenites. Appreciable uranium and phosphorus enrichment (1500 ppm of  $U_3O_8$  and 33% of  $P_2O_5$ ).

## 2.6.6. Resources

The resources evaluation made so far refers only to the main ore body located in the southeastern part of the area. The northern part and the eastern and western extensions, which have not yet been explored in detail, offer very good prospects for substantially increasing these resources.

Reasonably assured resources	34 000 t $U_3O_8$
Estimated additional resources	37 000 t $U_3O_8$
Total	<u>71 000 t <math>U_3O_8</math></u>

## 2.7. LAGOA REAL DEPOSIT, BAHIA

### 2.7.1. Background

With the purpose of reconnaissance of the Serra do Espinhaco area, in the north of Minas Gerais and Bahia, an aerial gamma-ray spectrometric survey on a regional scale was started in 1974–1975. In 1976 the Centre for Applied Geophysics/Centro de Geofísica Aplicado (CGA), working for the DNPM, began a detailed aerial geophysical survey over an area of 6000 km<sup>2</sup> in the southwestern region of Bahia (Urandi project), with east-west lines of flight and 0.5 km spacing. In June 1977 the CGA co-ordinating office informed NUCLEBRAS of the existence of a uraniferous anomaly near the small town of Lagoa Real in Caetité county, Bahia. This anomaly was among a group of anomalies located under the Espinhaco project which has not yet been verified on the ground. The favourable context and the more detailed and accurate indication provided by the CGA led to the commencement of field operations. Rapid verification in the field showed an anomaly completely lacking in thorium, where the total potassium and uranium counting channels revealed fairly high values (more than 50 times the background) at a lateral distance of about 200 m. Several aerial profiles were taken over the anomalous area at a low altitude (50 m) in order to obtain a better energy discrimination, more accurate localization and better definition of its dimensions. NUCLEBRAS geologists visited the area in the second half of 1977 and confirmed,

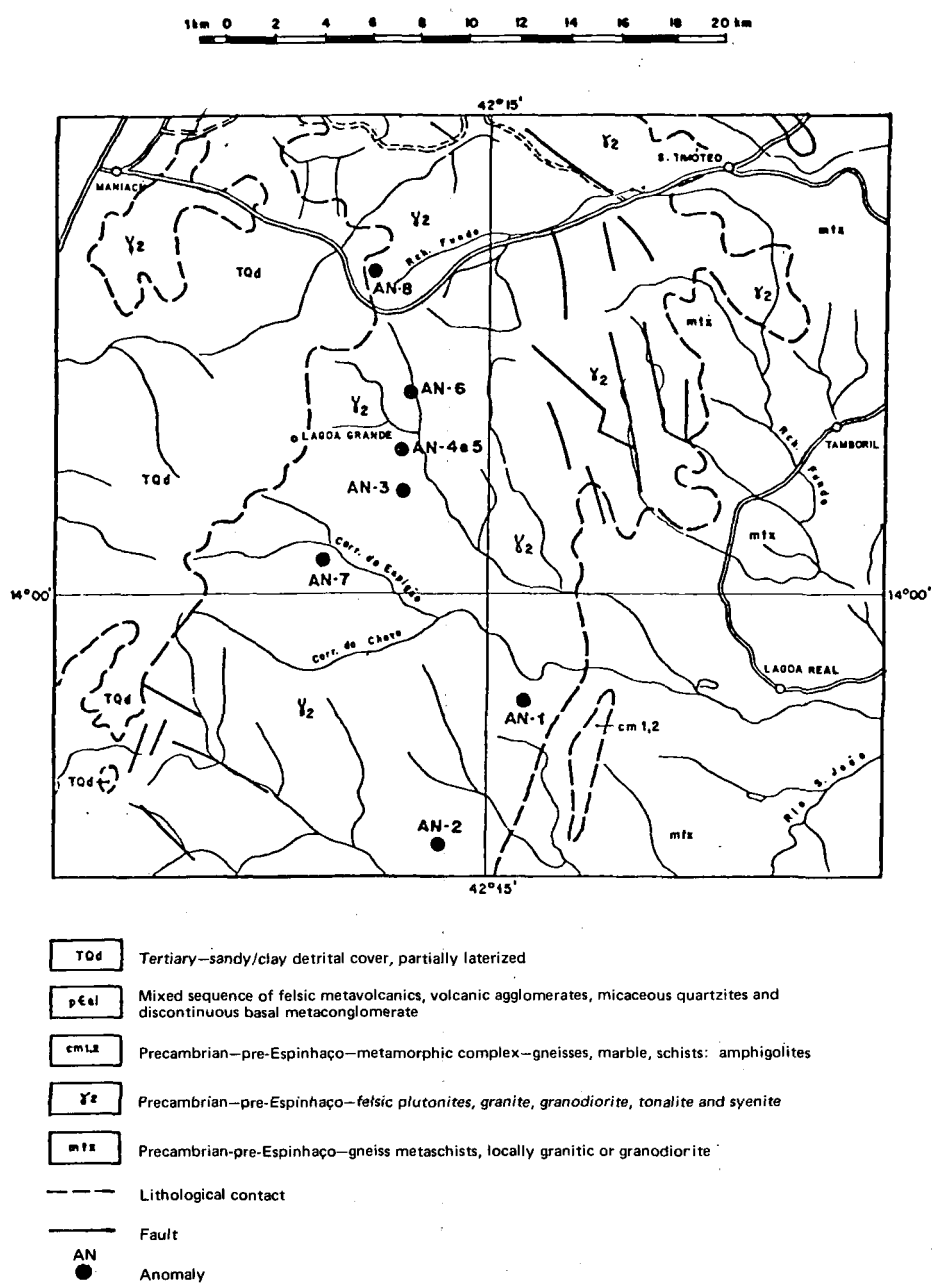


FIG.12. Regional geology of the Lagoa Real deposit (Bahia).

on the ground, the existence of a highly radioactive uraniferous anomaly with some values above 15 000 counts/s with a SRAP-SPP-2 scintillometer and with visible secondary mineralization (uranophane).

In the same period NUCLEBRAS checked the anomalies found as a result of re-interpretation of the aerial geophysical survey known as the 'Northern Espinhaco project' of 1974–1975 in an area just north of the town of Caetité. Ground check was made of all anomalies of the initially identified cluster observed within the same geological context as the Lagoa Real region. As a result a potentially interesting area of about 4600 km<sup>2</sup> was selected and designated as the Lagoa Real project. The first anomalies encountered are located in Caetité district.

### 2.7.2. Regional geology (Fig.12)

In the southern and central regions of Bahia there are outcrops of Precambrian metamorphic rocks covered by Tertiary and Quaternary sediments. In the area under study, situated to the east of Caetité, southwest of São Timóteo and west of Lagoa Real, there are outcrops of foliated, cataclased metamorphic rocks of coarse granulation showing equigranular granuloblastic, porphyroblastic and nebulitic textures. These rocks with prominent orientation and variable mineralogical composition have been classified by NUCLEBRAS technicians with the generic name of gneiss, appearing in the DNPM map (1:1 000 000) as 'diatexites'. The gneisses occur in an elongated belt in a general north-south direction, bounded in the west and south by metasediments of the Espinhaco supergroup, in the east and north by metamorphic pre-Espinhaco rocks and in the north-east by metasediments and metavolcanics of the Chapada Diamantina group. The gneisses are of variable composition, and so far the following lithologies have been described; microcline-pyroxene-gneiss; albite-pyroxene-gneiss; microcline-biotite-gneiss (lenticular gneiss); hornblende-quartz-syenite-gneiss; amphibolite. Microcline-biotite-gneisses with a background radioactivity of 150 counts/s predominate regionally.

The albite-pyroxene-gneisses are the host rocks of the uranium mineralization. They are felsic granuloblastic rocks with pronounced foliation and orientation as well as incipient fracturing, and they consist mainly of albite. Aegirine, augite and iron oxides occur secondarily. The secondary minerals are quartz, calcite, sericite, clay minerals, limonite and gummite. Garnet, zirconite, titanite, albanite and apatite have been identified as accidentals. These albite-pyroxene-gneisses occur as fusiform bodies, usually elongated in a general north-south direction, and are differentiated from the enclosing rocks by their mineralogical composition and, in part, by a greater degree of fracturing. The difference is generally difficult to detect with the naked eye.

TABLE I. URANIUM RESOURCES IN BRAZIL

Deposits	Reasonably assured resources (t)	Estimated additional resources (t)	Total (t)
<b>NUCLEBRAS</b>			
1. Poços de Caldas plateau, Minas Gerais	20 000	6 800	26 800
(a) County of Caldas	17 200	4 600	21 800
(b) Other areas	2 800	2 200	5 000
2. Figueira, Paraná	7 000	1 000	8 000
3. Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais	5 000	10 000	15 000
4. Amorinópolis, Goiás	2 000	3 000	5 000
5. Campos Belos, Goiás	500	500	1 000
6. Itataia, Ceará	34 000	37 000	71 000
7. Lagoa Real, Bahia	—	5 500	5 500
<b>NUCLAM</b>			
8. Espinharas, Paraíba	5 000	5 000	10 000
<b>TOTAL</b>	<b>73 500</b>	<b>68 800</b>	<b>142 300</b>

### 2.7.3. Uranium mineralization

Inside the albite-pyroxene-gneiss bodies there are zones of uranium mineralization, generally with N-S and NE-SW alignment, forming 'belts' or even 'boudins' and varying in thickness from a few centimetres to 40 m and in length from a few metres to 500 m. Uraninite and pitchblende are the main uranium minerals, and uranophane and gummite the secondary minerals.

Seven points of interest have been detected so far in the area of the Lagoa Real project. Of these, two were found by the Urandi aerial geophysical project (DNPM-CPRM (Compania de Pesquisa de Recursos Minerais)), three by the Northern Espinhaco project and two by car-borne radiogeological survey. Preliminary boreholes have revealed mineralized thicknesses between 0.5 m and 7.00 m, with concentrations between 850 and 6800 ppm of  $U_3O_8$ . The mineralization is distributed in layers inside the albite-pyroxene-gneiss, and several such layers have been found so far. The albite-pyroxene-gneiss clarkite is of the order of 36 ppm, and the enclosing rock, 15 ppm. The resources of the main uraniferous districts being evaluated are summarized in the Table I.

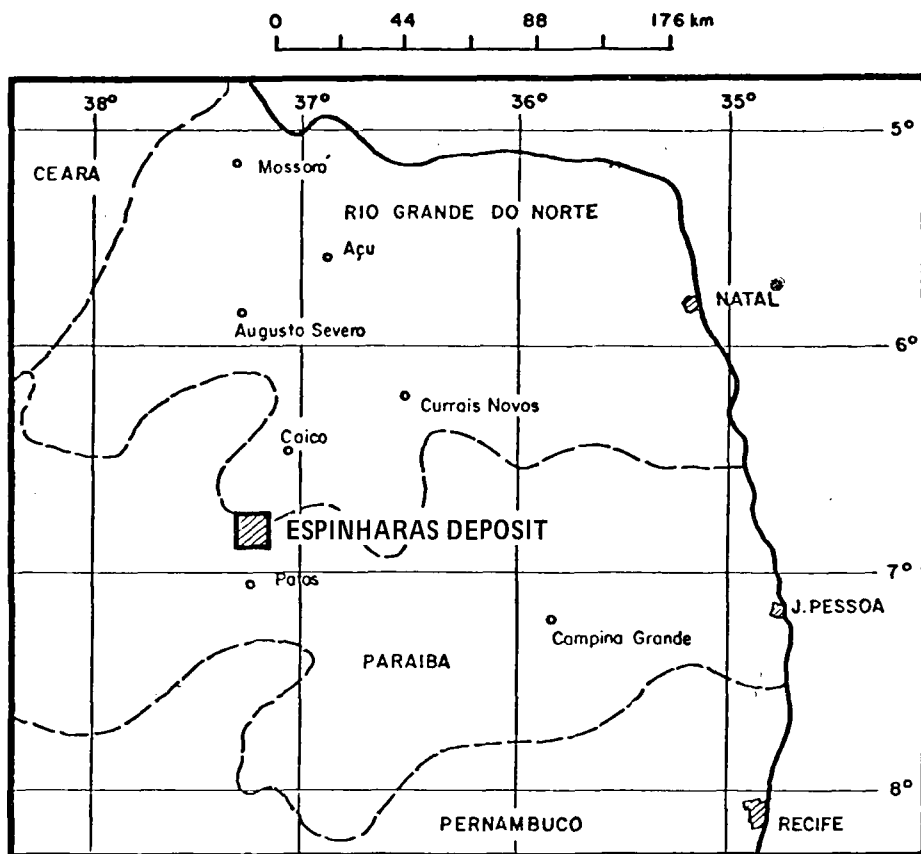


FIG.13. Location of the Espinharas deposit (Paraíba).

#### 2.7.4. Resources

The estimated resources are 5500 t of  $U_3O_8$ .

### 2.8. ESPINHARAS DEPOSIT, PARAIBA

#### 2.8.1. Background

Initially, the reconnaissance work conducted by NUCLEBRAS (NUCLAM) within its concession (34 000 km<sup>2</sup>) in the northeast of Brazil consisted of vehicle and helicopter radiometric and geological surveys. In 1976 the first anomalies were located. In 1977, 68 new anomalies were detected, mainly in migmatite

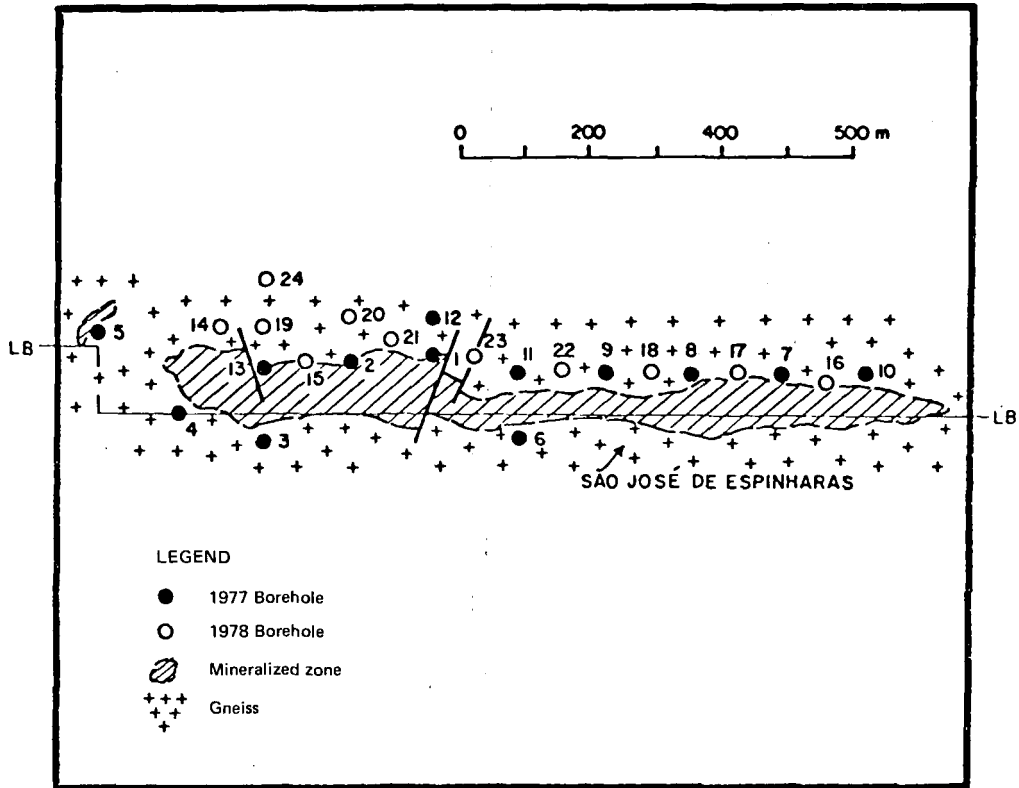


FIG.14. Geological sketch of the Espinharas deposit (Paraíba).

rocks, granites and soils. Of these, only a few warrant more detailed work because they are mostly due to the presence of thorium. Evaluation work started on 14 anomalies considered to be of greater interest, owing either to their radioactivity or to the extension or type of mineralization. A drilling programme was also started in 1977 in the Espinharas anomaly. The favourable results obtained led to an additional 10000 m of drilling in 1978 to estimate resources.

### 2.8.2. Location (Fig.13)

The Espinharas deposit is located in São José de Espinharas district in the northern and central regions of Paraíba state near the border with Rio Grande do Norte state, about 20 km to the north of the town of Patos.

### 2.8.3. Regional geology

The Espinharas deposit is situated in an area of Precambrian rocks of the Brazilian northeast. They are gneisses, migmatites and granites of the Upper Proterozoic (Ceará series) susceptible to the intrusion and infiltration of rocks bearing uranium minerals.

### 2.8.4. Uranium mineralization

The uranium mineralization occurs in dykes of feldspathic rocks enclosed in gneisses in an area of about 1.2 km<sup>2</sup> (Fig.14). It is related to metasomatic phenomena of the sodic type (albitization). The mineralized rock is composed of 80 to 90% feldspars, some biotite and smaller quantities of apatite and carbonates. Its grain-size varies from very coarse pegmatite to microcrystalline. In the proximity of dykes the enclosing rock (amphibolite-biotite gneiss) is infiltrated by feldspathic material. Various radioactive minerals, including uraninite, have been observed. The primary radioactive minerals were for the most part fully altered, forming unidentifiable secondary minerals at the surface.

The first boreholes established that uranium concentration increased at depth, reaching 0.06 to 0.08%. The uranium-thorium ratio and the solubility of uranium were also more favourable in samples from lower levels.

### 2.8.5. Resources

Reasonably assured resources	5 000 t U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Estimated additional resources	<u>5 000 t U<sub>3</sub>O<sub>8</sub></u>
Total	<u>10 000 t U<sub>3</sub>O<sub>8</sub></u>

## 3. COMMENTS

The first deposit to be exploited will be the one at Cercado in Minas Gerais, where operations are planned to start soon. The next ones likely to go into production on different scales are Figueira, Itataia and Amorinópolis. It is desirable to have different sources of production as this will make it possible to meet the demand more reliably.

The costs of the uranium extraction processes developed by NUCLEBRAS on the basis of concentrates from the different areas are competitive in relation to the international price of yellow cake, which is now US\$ 95 per kg of U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>.

Table I shows the present uranium resources in Brazil with their geographic distribution. The recent large contribution is due to the Itataia deposit in Ceará,

which accounts for 50% of the total known resources. The Lagoa Real region in Bahia now accounts for 5500 t of  $U_3O_8$ , classified as inferred resources. The figures cited for these two deposits are, however, not yet final. Both Itataia and Lagoa Real have in addition good potential which, with the progress of operations, should substantially increase the country's resources. The same may happen with the other areas described as their potential was not fully investigated.

The results obtained by NUCLAM during only two and a half years of work can be regarded as fairly significant. Although the resources known so far belong only to the *indicated* and *inferred* categories and further work has to be done to determine their viability, the fact that the mineralization has been identified is, in itself, a very positive factor. Its present uranium resources place Brazil in a fairly favourable position relative to other countries with uranium resources. As an additional source for obtaining uranium there is the possibility of recovering it as a by-product, mainly from phosphates. These problems are being investigated jointly by NUCLEBRAS and the enterprises owning phosphate deposits with recoverable concentrations of uranium.

## DISCUSSION

H.J. GOSO: I would like to know the genetic characteristics of the Itataia mineralization and its relation to the evolution of the Brazilian Shield.

G.J. AYRES: I would refer you to Paper IAEA-AG-162/29 by Angeiras et al. (these Proceedings).

P.A. SAMSON: What is the mineralogical composition of the feldspathic rocks, is it albitites with haematite?

G.J. AYRES: I would refer you once again to the paper I have just mentioned.

O. PARDO: I would like to know something about the uraniferous anomalies in phosphatic rocks detected on the frontier with Bolivia.

G.J. AYRES: I do not know much about these anomalies since I work in another region of Brazil. The work has only recently been started (aerial geophysics).



## PROGRAMA DE PROSPECCION DE URANIO EN CHILE

L.E. PEREZ, M. ROJO

Comisión Chilena de Energía Nuclear

R.L. MOXHAM

PNUD/OIEA,

Proyecto de Exploración de Uranio en Chile,  
Santiago, Chile

### Abstract-Resumen

#### URANIUM PROSPECTING PROGRAMME IN CHILE.

Uranium exploration in Chile began in 1950, with the participation of the United States Atomic Energy Commission, the Production Promotion Corporation, the Institute of Geological Research and the Chilean Nuclear Energy Commission/Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), together with the assistance of the International Atomic Energy Agency (IAEA). In 1974 the CCHEN set up an organization for implementing the National Radioactive Resources Plan with professional staff and technicians, laboratories, equipment and supplies geared to a high technological level. This enabled the organization to carry out activities such as the provision of services to enterprises requiring them. The exploration programme started with the search for background information on which to base regional geological exploration and ended with the selection of favourable areas that deserved to be subsequently evaluated. Use was made of the conventional methods of exploration, such as aerial, geochemical, geological-radiometric, and geophysical prospecting and drilling suitably adapted to the special geological, topographic and climatic conditions of the country. During the last few years the CCHEN, in collaboration with the IAEA, prospected a total of 105 000 km<sup>2</sup>, selecting an area of 5000 km<sup>2</sup> spread over 23 zones of small size for the second phase of exploration. At the same time, preliminary evaluation work has been performed on deposits of the "exotic" type and on veins of copper and phosphorite.

#### PROGRAMA DE PROSPECCION DE URANIO EN CHILE.

En Chile, la exploración por uranio comenzó el año 1950, con la participación de la United States Atomic Energy Commission, la Corporación de Fomento de la Producción, el Instituto de Investigaciones Geológicas y, últimamente, la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) en colaboración con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). En 1974, la CCHEN estableció una organización dedicada a desarrollar el Plan Nacional de Recursos Radiactivos (PNRR), contando para ello con profesionales y técnicos, laboratorios, equipos y materiales de alta tecnología. Esto capacitó a la institución para efectuar trabajos que le son propios, como la prestación de servicios a empresas que lo requieran. El programa de exploración ha tenido una secuencia lógica, iniciándose con la búsqueda de antecedentes para la ejecución de la exploración geológica regional y finalizando con la selección de áreas favorables merecedoras de posterior evaluación. Para efectuar estas labores se han empleado métodos tradicionales de exploración tales como la prospección aérea, geoquímica, geológico-radiométrica, geofísica y sondeos, adecuados todos ellos a las especiales condiciones geológicas,

topográficas y climáticas del país. En los últimos años la CCHEN, en colaboración con el OIEA, ha explorado un total de 105 000 km<sup>2</sup>, seleccionando para una segunda fase de exploración una superficie de 5000 km<sup>2</sup> distribuidos en 23 zonas de pequeñas dimensiones que serán estudiadas a partir de 1979. Paralelamente ha realizado trabajos de evaluación preliminar en yacimientos de tipo "exótico", vetas de cobre y fosforita.

## 1. INTRODUCCION

Con el objeto de lograr la independencia energética, Chile ha intensificado la búsqueda de combustible, en especial del uranio. Esta tarea está a cargo de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), a través de la Dirección de Materiales Nucleares (DMN), con la colaboración del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y la Organización de Estados Americanos (OEA). La CCHEN cuenta con un grupo de profesionales que llevan a cabo los programas de prospección trazados por ella, colaborando directamente en los planes de desarrollo del Gobierno.

### 1.1. Objetivos

Este trabajo tiene como objetivos mostrar la evolución de los trabajos de prospección en Chile desde sus comienzos en el año 1950 y presentar una síntesis del actual programa de exploración de uranio en Chile.

No se incluyen aquí informaciones sobre el programa de estudios e investigaciones metalúrgicas, cuyo objetivo es la producción de uranio como subproducto de otros procesos metalúrgicos.

### 1.2. El desarrollo energético y la exploración de uranio en Chile

La disponibilidad energética es un factor determinante en el desarrollo económico y tecnológico de un país. Chile no tiene suficientes recursos energéticos económicamente explotables, debiendo importar más del 45% del total de la energía requerida. En comparación con países industrializados, el consumo nacional de energía por habitante es modesto, pero relativamente alto frente a otros países en vías de desarrollo.

Las principales fuentes de energía utilizadas han sido la hidroeléctrica, el carbón, el petróleo y sus derivados. En estos momentos Chile utiliza, sobre el total del consumo de energía, un 24,2% de energía hidroeléctrica, un 14% de energía proveniente del carbón y un 61,8% de hidrocarburos, lo que demuestra la fuerte dependencia respecto al petróleo.

Debido a la situación mundial con respecto a este producto, el país ha visto la necesidad de recurrir a nuevas fuentes energéticas aprovechando al máximo los recursos nacionales de una u otra forma. Una de ellas podría ser la producción de electricidad mediante centrales nucleoelectricas, para lo cual el Gobierno está estudiando la factibilidad de su instalación. Por esto, resulta imprescindible determinar los recursos disponibles de materiales fisionables.

En 1965 se creó la Comisión Chilena de Energía Nuclear, con el objetivo de atender los problemas relacionados con la producción, adquisición, transporte, transferencia y uso pacífico de la energía nuclear y de los materiales nucleares. Posteriormente, vistas las necesidades descritas en el párrafo anterior, sus responsabilidades fueron ampliadas al incluir la búsqueda y determinación de materias primas. Con este propósito, el 4 de enero de 1974 se aprobó el Plan Nacional de Recursos Radiactivos (PNRR), considerando la "necesidad de centralizar, coordinar y dirigir las actividades relacionadas con la búsqueda, factibilidad y explotación de recursos radiactivos", y "la imperiosa necesidad de agotar las medidas para conocer el potencial del país en otros recursos energéticos que no sean los actualmente conocidos".

Con el fin de cumplir con las metas del PNRR, la Comisión creó la Dirección de Proyectos y Desarrollo, que en enero de 1976 derivó en la actual Dirección de Materiales Nucleares (DMN); ésta cuenta con geólogos, ingenieros, químicos y técnicos especializados que han establecido los programas de terreno, servicios de apoyo y logístico y ramas administrativas y legales que necesita un organismo dinámico de investigación de recursos naturales.

## 2. HISTORIA DE LA PROSPECCION DE URANIO EN CHILE

Hace 28 años comenzaron los primeros trabajos de prospección de uranio en Chile. Los primeros estudios fueron aislados en el espacio y el tiempo y siempre tuvieron carácter preliminar.

### 2.1. Período de 1950-56

En este período, la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos (AEC) y la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) efectuaron una revisión radiométrica en la zona norte del país, encontrando valores anómalos en vetas y minas de los distritos de Tambillos, Carrizal Alto y Pampa Larga. Se revisaron otros distritos mineros teniendo presente criterios paragenéticos para detectar sectores anómalos, encontrándose nuevas anomalías, ubicadas, por lo general, en rocas del Batolito Andino. Estudios semidetallados en la mayoría de estas anomalías arrojaron resultados negativos.

## 2.2. Período de 1958–60

Entre 1958 y 1960, la AEC y el Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG) efectuaron investigaciones de carácter regional en 15 áreas del territorio nacional, obteniéndose en 11 de ellas manifestaciones de uranio asociadas a:

- Vetas de alta temperatura en la región de la costa norte del país. Estas están representadas por los yacimientos cupríferos de Tocopilla, Algarrobo-El Roble, Carrizal Alto y Tambillos.
- Vetas de alta temperatura de cobre, molibdeno y tungsteno en chimeneas brechosas de cuarzo-turmalina. Tales son los casos de distritos mineros de Campanani, Sierra Gorda, Cabeza de Vaca y Rosario.
- En yacimientos cuaternarios de La Piadosa se encontró cobre y uranio asociados a capas de turba.
- En Río Correntoso y Cerro Castillo, provincia de Aysén, se encontró mineralización uranífera en vetas pegmatíticas asociadas a polimetálicos.

## 2.3. Período de 1971–73

Durante el año 1971, la CCHEN, con la asesoría del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), realizó un reconocimiento en el distrito de Carrizal Alto, utilizando para ello diversas técnicas.

En 1972, el Centro de Estudios Nucleares del Ejército, con la asesoría de la Junta de Energía Nuclear de España (JEN) realizó un estudio acerca de las posibilidades de recuperación de uranio a partir del complejo minero Chuquicamata-Exótica.

## 2.4. Período de 1974–78

Con la creación del PNNR se racionalizaron y canalizaron las investigaciones tendientes a la ubicación de yacimientos o áreas uraníferas potenciales. Se establecieron criterios de prospección, intensificando la búsqueda en terrenos sedimentarios y estableciéndose un orden de prioridad para los distintos ambientes geológicos. Se aplicaron las técnicas aéreas y terrestres para llevar adelante las tareas encomendadas y se pusieron en funcionamiento los laboratorios de química y petrografía.

En 1975 se firmó un convenio entre el Gobierno de Chile y el PNUD, con la participación del OIEA, con el objeto de apoyar técnicamente las labores de prospección general. Al mismo tiempo se amplió la búsqueda incluyendo tanto los terrenos sedimentarios como las rocas cristalinas. Asimismo, la CCHEN ha suscrito contratos de explotación con empresas estatales y privadas para apoyar las investigaciones en zonas restringidas.

Durante este período, la tarea ha sido exitosa, detectándose anomalías radiactivas y algunas manifestaciones uraníferas.

### 3. ORGANIZACION DE LA DIRECCION DE MATERIALES NUCLEARES

#### 3.1. Generalidades

La DMN (Fig.1) ha delegado la función específica de desarrollar la exploración de los materiales atómicos naturales y/o de interés nuclear en la División de Geología y Minería (DGM). Para ello, esta División cuenta con una dotación de 26 funcionarios entre profesionales, técnicos y administrativos, esperando contar en un futuro cercano con una plantilla de 45 personas.

El Departamento de Prospecciones tiene la misión de explorar los materiales radiactivos a escalas regionales o detalladas, que en determinado momento constituyan un proyecto de la CCHEN, o que constituyan un convenio entre este organismo y otra institución estatal o privada.

El Departamento de Técnicas de Apoyo es la unidad encargada de proporcionar apoyo a los otros departamentos técnicos, en materia de sondeos, fotogeología, topografía y dibujo cartográfico, de mantención y de servicios, para desarrollar los programas y/o proyectos de prospección.

El Departamento de Laboratorios es la unidad que proporciona apoyo a la DMN en lo que se refiere a la preparación mecánica y análisis químicos de rocas, análisis geoquímicos, análisis de aguas, sales y concentrados de minerales. Cuenta con una dotación de 20 funcionarios entre ingenieros, analistas y auxiliares. Su capacidad de análisis es de 120 muestras/día. Además se cuenta con un completo laboratorio de preparación y estudio de secciones petrográficas y mineralógicas.

La Unidad de Computación es la encargada de efectuar mediante la elaboración y uso de programas de computación, el archivo, ordenamiento, tratamiento estadístico y graficado de la información proporcionada y/o requerida por los diferentes proyectos.

La Biblioteca Técnica, dependiente de la Biblioteca Central de la CCHEN, dispone de todo el material bibliográfico, mapas y fotos aéreas necesarias para desarrollar los trabajos.

#### 3.2. Equipamiento

Para ejecutar la prospección, la Dirección cuenta con los siguientes equipos capitales:

- 1 avión Piper Navajo Turbo B
- 1 helicóptero Lama (arriendo permanente)

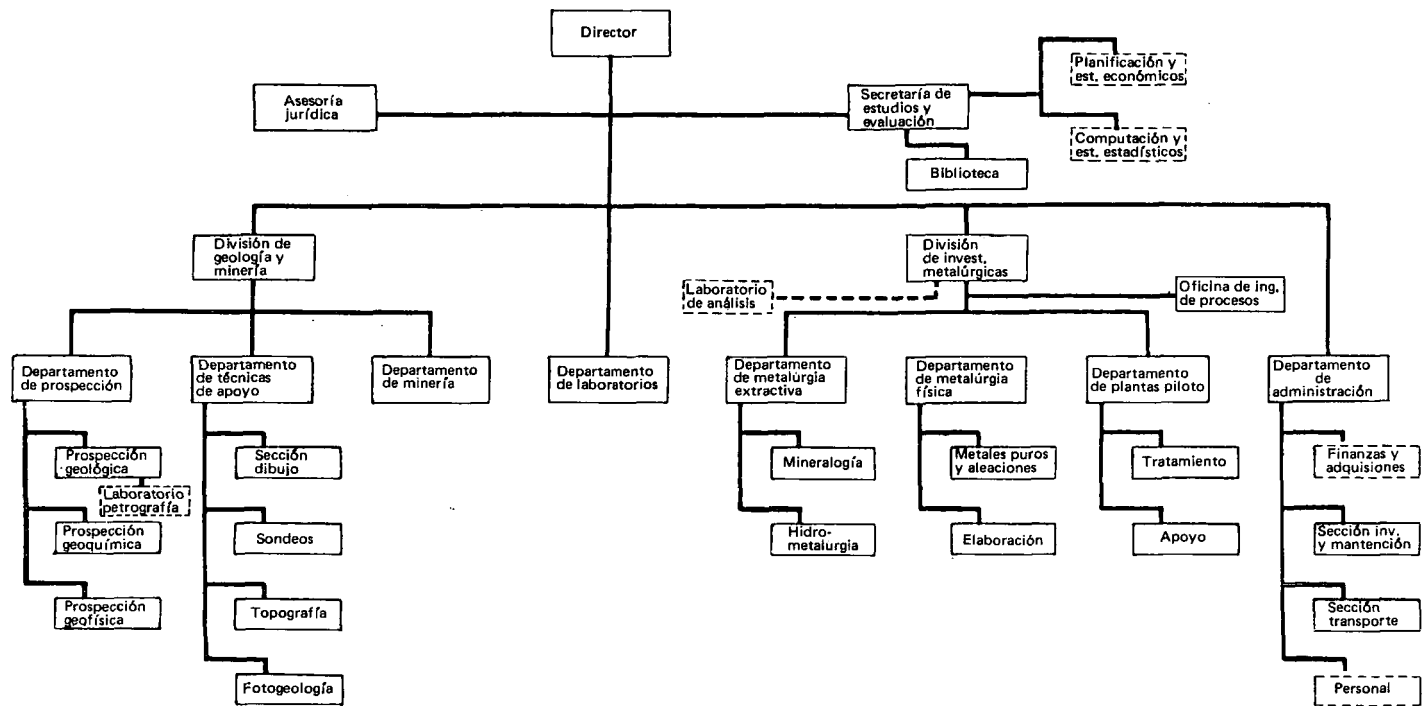


FIG.1. Organigrama de la Dirección de Materiales Nucleares (DMN).

- 16 vehículos todo terreno
- 2 sondas, rotary y diamante
- 1 sistema aeroportado compuesto por espectrómetro analógico, registrador de 6 canales, y cristal detector de 7,4 litros
- 2 emanómetros
- 30 escintilómetros y espectrómetros
- 1 equipo de registro de rayos gamma para sondajes
- 1 digitalizador de mapas y gráficos
- 1 computador IBM 370 con "plotter" Calcomp (servicio de convenio).

#### 4. METODOLOGIA DE TRABAJO

Hasta 1971, la prospección de minerales radiactivos en Chile estuvo enfocada al estudio de distritos mineros conocidos e investigaciones puntuales. En 1974 se planteó una nueva estrategia basada en el análisis de los antecedentes existentes para seleccionar grandes áreas con una o más características geológicas supuestamente favorables para la presencia de materiales radiactivos. Luego se confeccionó un plan sistemático de exploración a nivel nacional, que es el que actualmente se desarrolla. En él se han aplicado tres técnicas tradicionales de la prospección regional:

- Prospección aérea
- Prospección geológica-radiométrica
- Prospección geoquímica

Este programa contempla todas las fases secuenciales de la prospección, que pueden resumirse en:

- 1ª fase o reconocimiento general con presentación de información, a escala 1 : 250 000, para definir áreas de mayor favorabilidad, y que es lo que se realiza actualmente;
- 2ª fase o reconocimiento de áreas favorables, con presentación de información a escala 1 : 50 000 o más para definir estructuras, formaciones favorables y/o zonas de mayor interés;
- 3ª fase o estudios detallados de superficie con el objeto de definir yacimientos hipotéticos;
- 4ª fase o reconocimiento tridimensional y evaluación de los recursos encontrados.

Aparte de las actividades de prospección general, la CCHEN ha suscrito convenios con empresas del Estado con el objeto de desarrollar proyectos específicos de evaluación de yacimientos cuyo uranio pueda ser recuperado como subproducto.

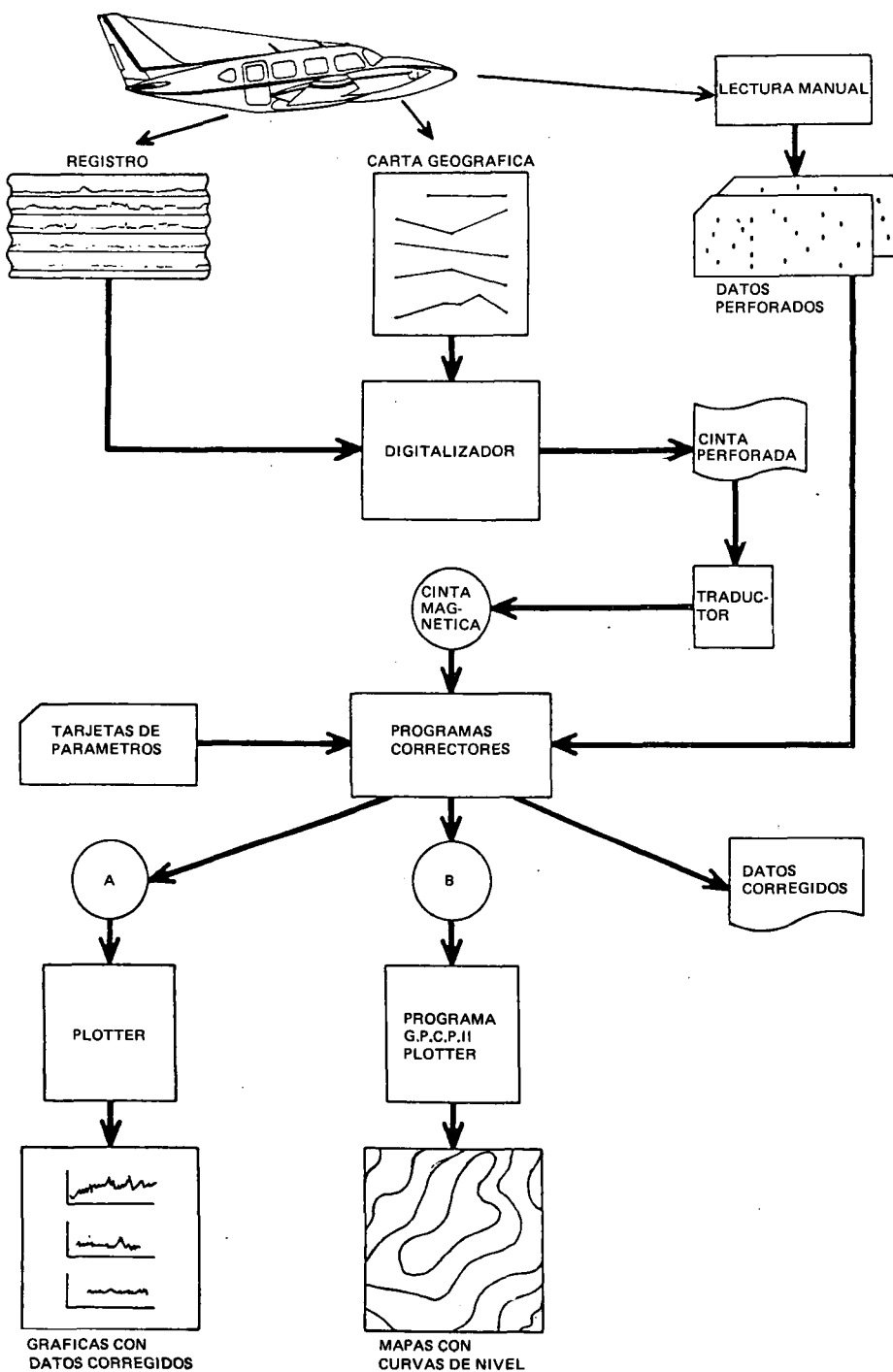


FIG.2. Prospección aérea – Diagrama del flujo de datos.

#### 4.1. Prospección aérea

En 1971, la CCHEN junto con el IIG y el OIEA realizaron un programa de entrenamiento de personal, con una duración de 100 horas de vuelo.

Con la compra de un avión y los equipos necesarios para efectuar prospección aérea, en 1975 la CCHEN dió comienzo a un vasto programa de exploración en el que se tuvieron en cuenta todas las modalidades para esta técnica — vuelo de “ladera” o irregular para reconocer formaciones geológicas, y vuelos sistemáticos con espaciado de líneas desde 0,5 a 5 km — de acuerdo con los objetivos fijados. Por la abrupta topografía del país se debió recurrir al helicóptero, aprovechando así las grandes ventajas que proporciona en lo que se refiere a manejabilidad y eficiencia. A pesar de que su costo de servicio por kilómetro lineal es más alto que el del avión, la Comisión está considerando realizar todos los futuros reconocimientos aéreos con esta aeronave.

La información adquirida, tradada al principio manualmente, en la actualidad se digitaliza pasando luego al computador. Los programas que permiten realizar las operaciones de cálculo, corrección de los datos y confección de mapas en forma automática han sido diseñados por el mismo grupo de Prospección Aérea. De este modo se han llegado a producir, en un mínimo de tiempo, los mapas de C/T, U, Th, K, de razones U/Th, U/K, Th/K y perfiles corregidos a la escala que sea necesario (Fig.2).

La prospección aérea tiene como finalidad definir y ubicar zonas de interés radiométrico para guiar y definir los programas terrestres. Hasta la fecha, la experiencia nos enseña que este método es apto y adecuado para las condiciones que prevalecen en el país; se han reconocido hasta ahora 89 800 km lineales, o una superficie de 69 488 km<sup>2</sup>.

#### 4.2. Prospección geoquímica

En Chile, esta técnica comenzó a ser utilizada sistemáticamente en la prospección de materiales radiactivos en 1975. Los trabajos han consistido en la toma de muestras de sedimentos de drenaje, suelos y aguas y, en algunos casos, en mediciones de radón en aguas y suelos. Los reconocimientos, regionales, abarcaron una superficie de 73 000 km<sup>2</sup>. La malla de muestreo ha sido irregular, obteniéndose una cobertura media de una muestra por cada 2 a 3 km<sup>2</sup> de superficie. En áreas de ambiente desértico se han realizado diversos muestreos con el objeto de investigar cuál de ellos es el más adecuado para estas zonas. Esta información está siendo evaluada actualmente.

El proceso de los datos obtenidos se realiza a través de un computador, valiéndose de los programas proporcionados por el OIEA. Para la interpretación de los resultados se han tomado en cuenta las especiales condiciones del país (Fig.3).

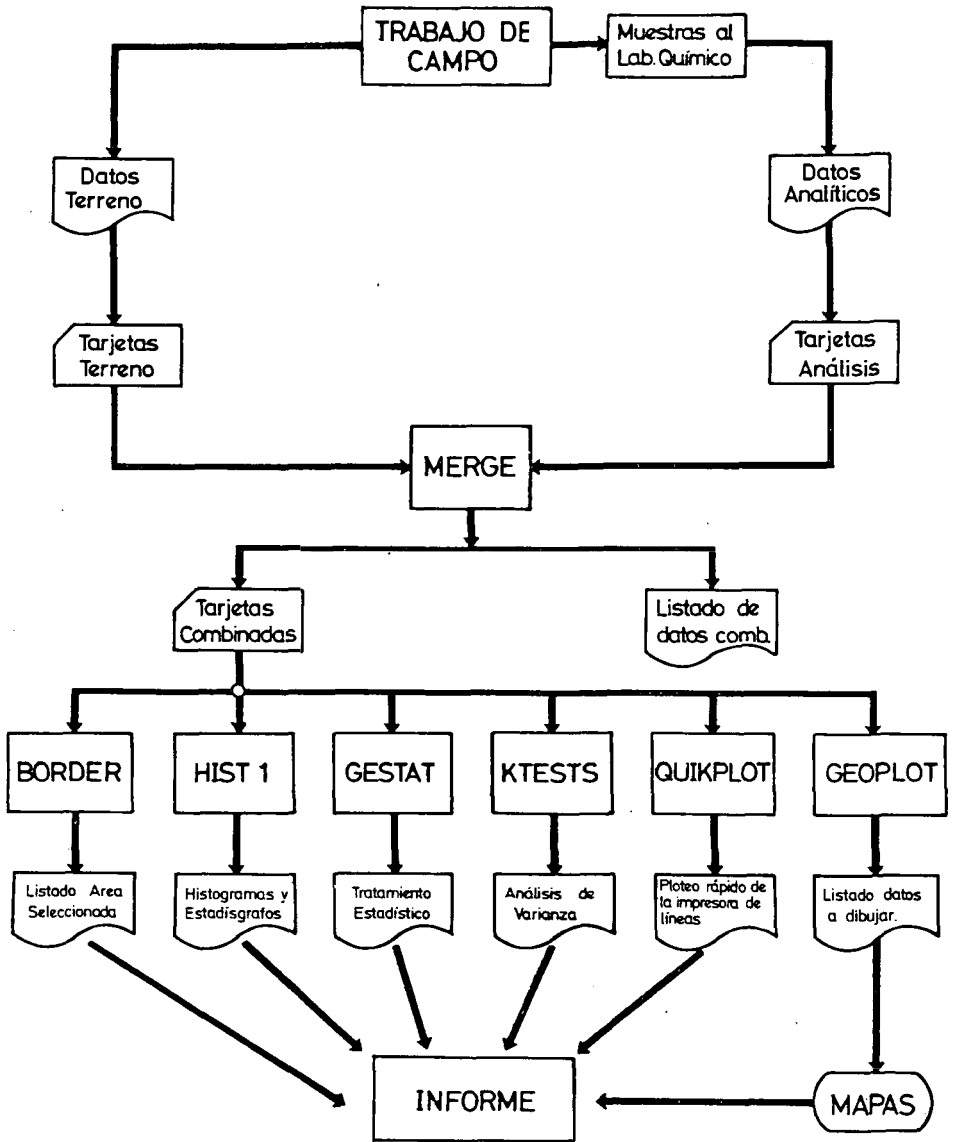


FIG.3. Prospección geoquímica – Diagrama del flujo de datos.

Esta técnica ha sido un apoyo básico para las interpretaciones generales de la primera fase de exploración al proporcionar una información adecuada sobre la dispersión y la distribución del uranio en sedimentos, a nivel regional, y recomendar zonas para su posterior estudio detallado. Además, está contribuyendo directamente al conocimiento regional de otros elementos, analizados por información sobre la distribución regional de otros elementos, analizados por nuestro laboratorio (Cu, Pb, Zn, Ag, Mo, Co, Mn, Ni, Hg) tratados en conjunto con el uranio.

Un aspecto del programa general ha sido el análisis de rocas colectadas en el curso de los reconocimientos geológico-radiométricos. Se ha considerado útil el desarrollar conceptos generales sobre la abundancia de uranio en diversos tipos litológicos, lo que permitirá conocer la distribución y comportamiento geoquímico básico del U en el país. Así, se pueden establecer conceptos sobre la fertilidad y transporte del elemento. De acuerdo con esta idea, se han analizado cerca de 2300 muestras por uranio total y uranio labil. Los resultados se han reflejado en mapas de fertilidad o favorabilidad.

#### **4.3. Prospección geológica-radiométrica**

En 1975 comenzó el programa de prospección geológica-radiométrica regional. Durante el inicio del mismo, gran parte de los esfuerzos se dirigieron a obtener, compilar y, en algunos casos, a confeccionar los mapas de geología básica de las zonas a prospectar.

Por otra parte, las especiales condiciones topográficas y geológicas de Chile llevaron a la necesidad de investigar e implantar un sistema de prospección radiométrica autoportada, incluyendo observaciones geológicas sistemáticas que se completaron con perfiles geológico-radiométricos semidetallados. Para ello se desarrolló una sistemática de toma de datos geológicos y radiométricos aptos para ser tratados por informática. Esta información ha permitido establecer conceptos de favorabilidad relativa para los ambientes geológicos chilenos, lo cual se ha reflejado en mapas de radiometría, favorabilidad de unidades geológicas, distribución de elementos y de sectores seleccionados, producidos para cada área estudiada (Fig.4).

Hasta la fecha se ha obtenido información geológica-radiométrica de unos 84 000 km<sup>2</sup> de superficie, que ha sido presentada en mapas a escala 1 : 250 000.

### **5. PROYECTOS EN EJECUCION**

#### **5.1. Proyecto CHI/74/005**

Este proyecto, resultante de un convenio entre el Gobierno de Chile y el PNUD con la participación del OIEA, fue aprobado y firmado el 18 de febrero

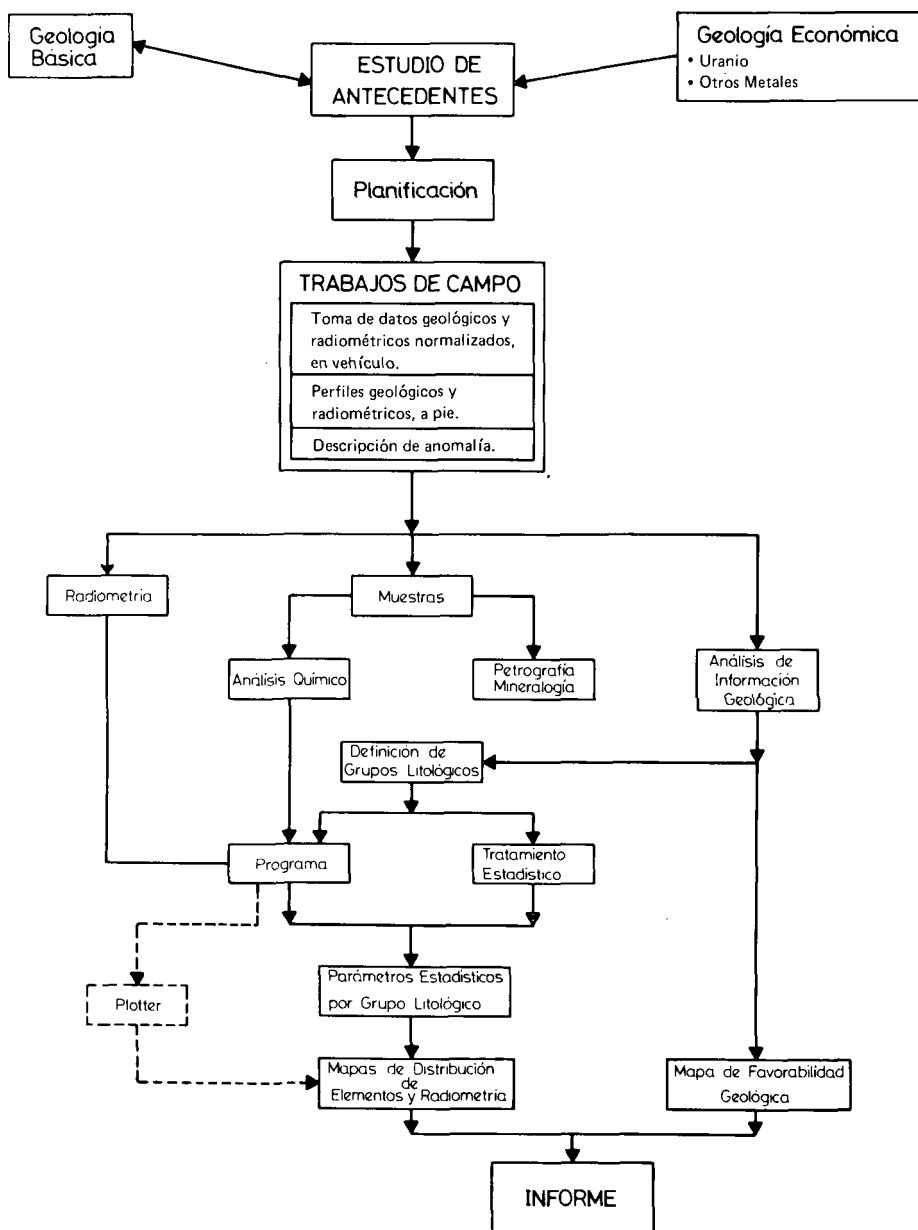


FIG.4. Prospección geológica y radiométrica -- Diagrama del flujo de datos.

de 1975. Su vigencia era de 42 meses y la dotación para investigación superior al millón de dólares. Sus objetivos fueron de capacitación de personal y de asesoría en la exploración de 24 000 km<sup>2</sup> (de acuerdo con la estrategia general planteada en el capítulo 4) repartidos en 7 áreas seleccionadas del territorio nacional. Pronto se consideró que la superficie inicialmente propuesta no cubría completamente las posibilidades de las áreas originales y se decidió su extensión hasta un total de 105 000 km<sup>2</sup>. Como se ha dicho, a esta situación se sumó el hecho de que gran parte del esfuerzo inicial se dedicó a la información geológica básica. Por estas razones, se concluyó que para llevar a cabo las etapas descritas en el proyecto, se necesitaría más tiempo del previsto, tomando en cuenta los recursos humanos y materiales disponibles. Se prevé que el programa requerirá cerca de 70 meses.

En estos momentos está prácticamente terminada la 1ª fase de exploración regional, seleccionándose para la exploración detallada una superficie de 4000 a 5000 km<sup>2</sup> distribuidos en 23 áreas de pequeñas dimensiones.

En la actualidad, la CCHEN ha propuesto una extensión de dos años del proyecto de cooperación PNUD, de modo que la secuencia operativa programada inicialmente continúe hasta la última fase de la exploración, permitiendo así que el esfuerzo inicial realizado no sea interrumpido.

## 5.2. Proyecto uranio-cobre

El proyecto uranio-cobre fue creado el año 1976 con el objeto de investigar la presencia de minerales radiactivos en los principales yacimientos cupríferos del territorio nacional.

Los antecedentes que justificaron este proyecto fueron los obtenidos del yacimiento Chuquicamata. En 1970 se detectaron ciertos contenidos de uranio en las soluciones de lixiviación de este mineral. En 1972 se elaboró un informe geológico preliminar del yacimiento para definir su favorabilidad con vistas a una explotación de uranio como subproducto en los cuerpos mineralizados de Chuquicamata y Exótica. Los resultados obtenidos permitieron detectar la presencia de reducidas, pero significativas cantidades de uranio en los óxidos de cobre, lo que justificó la realización de posteriores estudios de evaluación.

En 1976 se formó un grupo de trabajo que se dedicó a realizar una revisión de los yacimientos de cobre porfídico y de tipo exótico. Así es como hasta la fecha se han evaluado preliminarmente los yacimientos Exótica y Sagasca, obteniéndose en ambos resultados promisorios.

Paralelamente, desde 1975, un grupo de trabajo ha dedicado su esfuerzo a analizar los antecedentes de pequeños distritos mineros y pilas de minerales de plantas de tratamiento que, con anterioridad, habían sido revisados por organismos extranjeros y estatales.

Este grupo ha clasificado la información obtenida y, junto con la aportada por los grupos de exploración terrestre, se ha hecho una selección de distritos para su posterior estudio detallado.

### 5.3. Proyecto uranio-fósforo

El proyecto uranio-fósforo se inició en 1976 con el objeto de asesorar a la Secretaría Regional de Planificación y Coordinación (SERPLAC) de la II Región de Antofagasta y el IIG en la búsqueda de fosfato. Es así como se ha estudiado en forma preliminar una zona de aproximadamente 15 km<sup>2</sup>, donde se han detectado niveles de fosforita con concentraciones que se sitúan entre 5 y 40 ppm de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. Vistos los volúmenes que representan las fosforitas, podrían constituir una fuente potencial como subproducto de su explotación. La factibilidad depende, obviamente, de los aspectos económicos de extracción y comercialización del fosfato, lo que en este momento se está estudiando.

## 6. CONCLUSIONES

La prospección de uranio en Chile ha sido poco constante. Esto ha llevado a la necesidad de aunar esfuerzos para conseguir en el mínimo de tiempo, el mayor conocimiento respecto de los recursos de materiales nucleares y, consecuentemente, de la capacidad para generar la energía necesaria para seguir en la línea de un país en desarrollo, con todas las consecuencias que esto último encierra.

Chile ha realizado un gran esfuerzo para crear una organización estable, con personal capacitado y entrenado para cumplir diversas funciones, teniendo además el equipo necesario para llevar a cabo los programas y/o proyectos que le sean encomendados. Estos se desarrollan con una estrategia de trabajo y una metodología modernas.

Se han aplicado técnicas aéreas y terrestres, lo que ha dado como resultado la exploración regional integral de 105 000 km<sup>2</sup> de superficie, y permitido la selección de una superficie cercana a los 5000 km<sup>2</sup> para una etapa más avanzada de exploración.

Las evaluaciones preliminares de yacimientos cupríferos de tipo exótico han dado resultados promisorios, lo que ha constituido el punto de partida de programas de factibilidad para la recuperación del uranio contenido en ellos como subproducto.

## DISCUSSION

J.A. FERNANDEZ: The characteristic tectonics and volcanism of Chile make those of us concerned with uranium exploration believe that a new type of genuinely Andean deposit could be found at any moment. Has there been any progress with this idea or have any significant uraniferous indices of this kind been found?

L.E. PEREZ: The indices that we have found so far during exploration work are of the vein type with high-temperature mineralogy. This does not mean that there must be other types of manifestation in other parts of the country. As you said, these manifestations could correspond to a new type of deposit with characteristics quite different from those we have traditionally known. It is important to continue with the exploration in order to try and find such indices or others of a traditional type.

C. PREMOLI: If I understood you correctly, you made mention at the beginning of your paper of Chilean uranium occurrences in a Quaternary environment. This sounds pretty unusual. Can you please tell us briefly what it is all about?

L.E. PEREZ: The Piadosa deposit is a Quaternary terrace in which we have found urano-organic compounds related to two or three levels of peat. It is assumed that the uranium comes from the leaching of the granites that surround the terrace-uranium which was later fixed by the organic material.

P.A. SAMSON: What is the uranium content in Chuquicamata and what type of uraniferous phosphate is present?

L.E. PEREZ: Chuquicamata is a mining complex made up of three deposits: North Pampa, which is now called North Chuqui, Chuquicamata and Exótica, which is now called South Chuqui. The values that I am going to give you are for the Exótica mine. For one sector of the mine, weathering zone 3, the values are 15–20 ppm. The zones of weathering 2 and the fresh material have a lower content, between 5 and 10 ppm. The phosphates, which have been studied in a very preliminary way, are Tertiary and are situated in the Mejillones Basin. The most interesting phosphorite levels have a thickness of approximately two metres.

M. MARTIN: I would like to say something in answer to Mr. Fernández' question. The geological favourability criteria used for the prospecting in Chile have been undergoing modification as a result of frequent observations of the violent tectonic movements and the very extensive basic volcanism which affect a large part of the geological formations. The indices so far found are generally of the vein type. There are also so-called breccia chimneys, but I don't know if these occur in other countries in the Andean region. All are high-temperature mineralizations.

J. SOSA: Are the seven areas mentioned in the Chilean Nuclear Energy Commission plan the best regions in Chile for uranium studies?

L.E. PEREZ: These areas constitute only the first part of the national exploration programme. We plan in the future to explore the high Cordillera in the northern zone, especially what has been called the Altos de Pica Formation of the Plio-Pleistocene, which is made up of lava flows and acidic pyroclastics, sandstones and muds. We also have the Mesozoic basins of Patagonia and Aysen. I could list other zones as well, but I think that it is better to leave further discussion of this subject to the working sessions.

J. SOSA: What results and operational indications have you obtained by mixed carborne prospecting?

L.E. PEREZ: This is a very interesting question. In general, people believe that carborne prospecting should be confined to radiometry because of the low cost involved and the speed with which the survey is then made. On the other hand, the radiometry information from prospecting has to be transferred to geological maps so that the relative favourability of the formations can be interpreted. If one is undertaking exploration of an area in which this basic geological information is inadequate or altogether absent, it is better to carry out what you have called mixed prospecting (what we refer to as geological-radiometric prospecting). The cost is naturally higher because a large part of the field work has to be done by a geologist, but the final information will be of great reliability. If the geological data are plotted on maps, this can represent an important contribution to the basic cartography of the country. I believe that it helps national development. We are in a position to say that the results we have obtained from this system are very good. We have revised the basic geological information for all the areas in which exploration has been carried out.

## PRELIMINARY RECONNAISSANCE FOR URANIUM IN PARAGUAY

C. PREMOLI

International Atomic Energy Agency,  
Vienna

J.C. VELAZQUEZ

Comisión Nacional de Energía Atómica,  
Asunción,  
Paraguay

### Abstract—Resumen

#### PRELIMINARY RECONNAISSANCE FOR URANIUM IN PARAGUAY.

In 1978 the government of Paraguay embarked on a programme covering the whole national territory to assess the potential of its radioactive raw materials. This programme was carried out, with some assistance from the International Atomic Energy Agency (IAEA), for a period of six months. Given the vastness of the country and the limited means available, precise metallogenetic targets were selected as a guide for the search. A severely cost-controlled approach was chosen on the assumption that in geologically poorly explored countries even a limited exploration expenditure can still be very effective in selecting attractive targets for follow-up work. Maximum emphasis was put on the practical training of national personnel, particularly on exploration strategies and management. Satellite imagery, photo interpretation, airborne and car-borne reconnaissance, field and laboratory geochemistry and, above all, direct field investigation were the techniques used. Three metallogenetic themes were selected as having good exploration potential: (1) uraniferous calcrete; and uranium in (2) continental sandstones, or in (3) orthomagmatic differentiations. Significant areas of interest and one significant occurrence were pinpointed during this first six months regional exploration phase.

#### RECONOCIMIENTO PRELIMINAR DE URANIO EN EL PARAGUAY.

En 1978, el Gobierno del Paraguay emprendió por primera vez un programa que abarcaba todo el territorio nacional para evaluar su potencial de materias primas radiactivas. Este programa fue ejecutado con asistencia del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) durante un período de seis meses. Dada la gran extensión del país y los limitados recursos disponibles, se seleccionaron objetivos metalogenéticos precisos que sirviesen de guía en la búsqueda. Se optó por un enfoque de riguroso control de los costes, partiendo del supuesto de que en los países geológicamente poco explorados, incluso los limitados gastos de exploración pueden ser muy útiles al efecto de seleccionar objetivos interesantes para los trabajos consecutivos. Se atribuyó máxima importancia a la capacitación práctica de personal nacional, en particular con respecto a estrategias y gestión de la exploración. Las técnicas utilizadas fueron la obtención de imágenes por satélites, interpretación de fotografías, reconocimiento aéreo y con vehículos de motor, geoquímica de campo y de laboratorio, y, sobre todo, investigación directa sobre el

terreno. Se seleccionaron tres posibilidades metalogenéticas con un buen potencial de exploración: 1) caliches uraníferos; y el uranio en 2) areniscas continentales, o en 3) diferencias ortomagmáticas. Durante los primeros seis meses de exploración regional se localizaron zonas significativas de interés así como una manifestación importante.

## INTRODUCTION

In 1976 the government of Paraguay decided to commence exploration for radioactive raw materials throughout its entire national territory and sought assistance from the International Atomic Energy Agency (IAEA). Exploration activities started in January 1978 and were carried out jointly by the Instituto de Ciencias Básicas de la Universidad Nacional de Asunción and the Dirección Industrias Militares. Exploration for radioactive raw materials in Paraguay was particularly interesting as very little had been done in this field and the country was hardly known geologically. The results of the first regional phase of exploration proved most encouraging.

## GEOLOGICAL SETTING OF PARAGUAY

Paraguay is a country of 406 750 km<sup>2</sup> situated in the southwestern part of the South American Plate. Its geology has only now begun to be studied in some detail and considerable doubt exists as to the exact chronology and distribution of some of its formations.

A diagram of the broad outline of Paraguayan geology is given in Fig. 1. The most evident characteristic of Paraguay is the asymmetry, which finds its explanation in the general geology of South America, Paraguay being situated between the Andean orogeny and the only locally mobilized Brazilian Shield. The Paraguay River, which flows approximately through the centre of the country, has exposed by erosion a long 'window' of Precambrian and Palaeozoic formations that separate two main basins, namely, the Chaco Basin and the Paraná Basin.

## WESTERN PARAGUAY OR CHACO

Western Paraguay, or Chaco, represents almost 60% of the country. It is covered with Quaternary formations which can be regarded as behaving like glaciers of sediment; they originate in the Andes piedmonts and keep moving eastward, progressively shifting the course of the Paraguay River towards the Paraná Basin.

The vast recent depositional surface of the Chaco makes this region unprospectable for uranium with the presently known techniques. In this respect

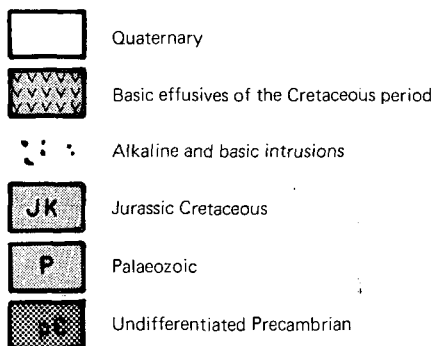


FIG.1. Outline of the geology of Paraguay.

the Chaco is similar, for instance, to the Great Artesian Basin in Australia, most of the Antarctica and Greenland, or the sand-covered areas of North Africa and Central Asia.

The very rare exposures of older formation outcropping in the Chaco represent less than 2% of its total surface and are grouped near the Bolivian frontier. They are sediments of Lower Palaeozoic age and appear to be largely unaffected by the Andean orogeny. The Chaco region of Paraguay compares very closely with the 'area oriental' of Argentina where no radioactive occurrences of any nature have been found so far [1].

## EASTERN PARAGUAY

In the eastern Paraguay region the erosional surfaces are more abundant and the thickness of the alluvions is incomparably smaller than those of the Chaco. The exposed formations are both volcanic and sedimentary (essentially continental) members of the Paraná Basin sequence and rest on a poorly exposed basement of granites, marble and older gneiss. A tentative diagram of the geochronology of Paraguay is given in Fig. 2. As the basalt cover of the Paraná series is of negligible potential for uranium exploration, the surface of 'prospective' areas of Paraguay is even further drastically reduced.

One of the most interesting features of Paraguay is the abundance of basic and alkaline intrusions. More than 40 such bodies have been recognized, all of them in the eastern region or along the course of the Paraguay River. Two distinct cycles seem to have been recognized: one probably Cretaceous with markedly alkaline characteristics, and a second, Eocene, of essentially basic associations and varying in composition from essexite to plagiofayaite with some volcanic episodes represented by tephritic phonolites.

The major elements of Paraguay geology can therefore be summarized as a small central salient of crystalline basement (8% of Paraguay) over which rests the gently folded Palaeozoic platform cover (exposed over about 25% of the country), episodic and well differentiated late Mesozoic or Tertiary intrusions, and very extensive recent alluvions effectively masking almost two-thirds of the country.

If the thick recent Quaternary and the basaltic cover of the Paraná are excluded as areas of almost negligible uranium potential, the surface of Paraguay suitable for prospection is very significantly reduced. It is on this comparatively narrow area that the regional exploration effort has been focused.

The morphology of Paraguay is an essentially mature one with only a few areas of relief, none of which exceed a height of 500 m above the alluvial plains. The soils closely follow the pattern of the geological units, with 'terra rossa' developed over the Paraná basalt, humic gleys in the central part of Paraguay,

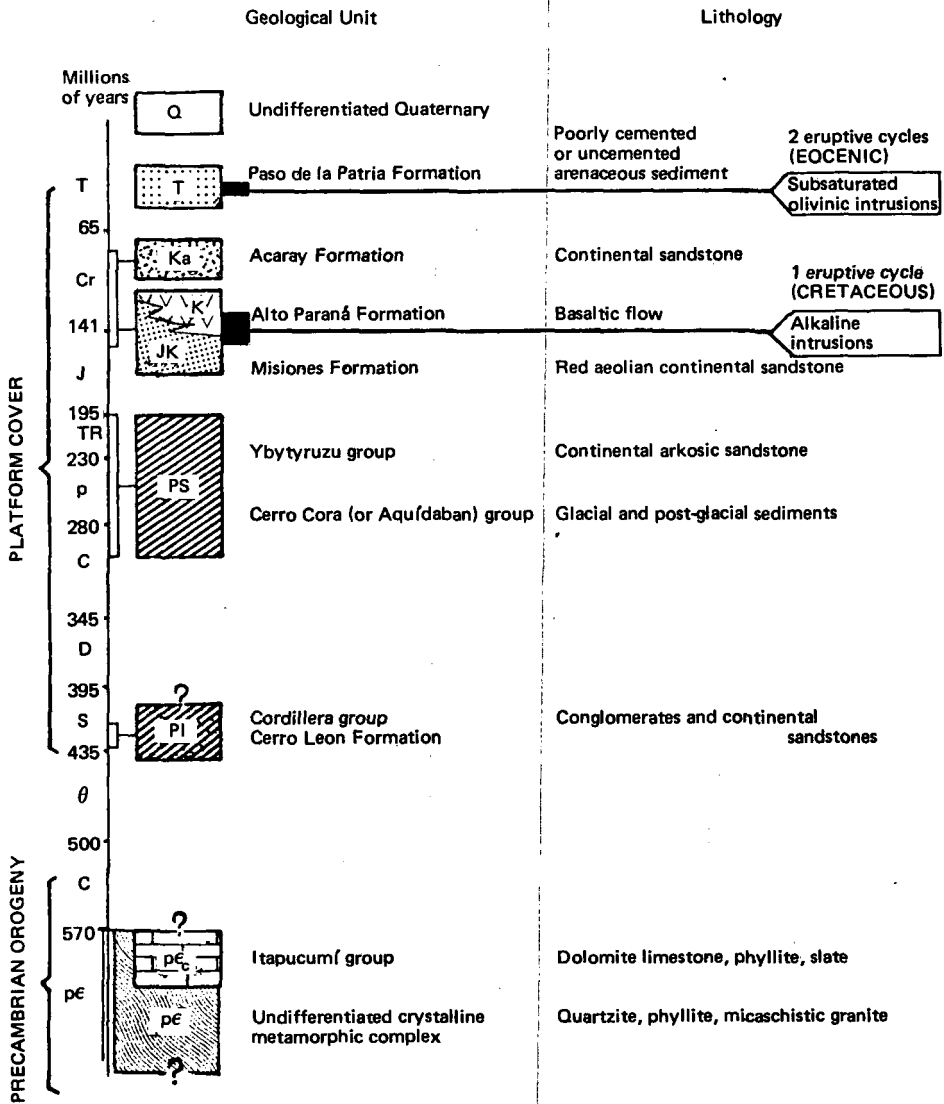


FIG.2. Tentative geochronological diagram of Paraguay.

and reddish chestnut soil on the Chaco alluvial deposits. The vegetation varies from temperate rain forest to savannah. The mean annual precipitation is between 50 and 200 mm per year. In effect, the geographical and climatological characteristics of Paraguay are comparable to parts of eastern Africa or north-eastern Australia. All these factors have been carefully weighed in selecting appropriate exploration techniques.

## EXPLORATION PHILOSOPHY AND SELECTION OF A METALLOGENETIC MODEL

The exploration philosophy applied in Paraguay was rather conventional and closely followed the threefold principle recently summarized by Dalkamp [2]:

- (a) elaboration of geological metallogenetic models,
- (b) choice of suitable investigation techniques, and
- (c) formation of a field team under competent management.

Given the small amount of geological information available in Paraguay, the first task was achieved essentially by extrapolating the geological and metallogenetic information available on bordering countries, particularly Brazil and Argentina, where major uranium deposits are known. The works of Castanho Maciel [3] and Stipanovic [4] proved particularly useful in this task. Out of various classifications of genetically arranged uranium deposits [5–8] some potentially favourable situations were selected for Paraguay, the basis for this selection being the time-space relationship between known occurrences and the broad tectonic setting of Paraguay.

A provisional geological and metallogenetic map of the whole of Paraguay was prepared on a scale of 1:1 000 000 and, although undoubtedly inaccurate, it proved very useful for plotting and discussing the various exploration concepts.

It was soon apparent that the conditions responsible for the genesis of the Argentinian and Bolivian Cordillera uranium deposits were not present in Paraguay, which has been almost totally unaffected by the Andean orogeny. The quest for a metallogenetic model was then shifted in favour of deposits formed in stable shield conditions, as in the Brazilian and Namibian types.

Table I gives a schema of the various exploration targets. It can be seen that three possible exploration targets were suggested for the first phase of ground reconnaissance, namely, orthomagmatic deposits, sandstone-type deposits, and calcrete deposits. Undoubtedly personal past experience and inevitable prejudices played an important role in target selection. Any metallogenetic model should be seen only as a highly subjective and easily changeable basis for exploration. This is perhaps more true for uranium than for most mineral commodities, as uranium often tends to form atypical deposits, and the last ten years have seen an impressive

number of uranium discoveries in new environments previously thought unfavourable. Figure 3 shows the known mineralization in Paraguay.

Pragmatism and flexibility in field exploration should always balance perhaps rigorous but always theoretical geological thinking; Nininger recently stressed this point convincingly [9].

## CHOICE OF EXPLORATION TECHNIQUES

Paradoxically, one of the advantages of exploration work in Paraguay is that, very little having been done before, relatively simple techniques can have an effectiveness (at least in the regional, target-identification stage) unparalleled in most developed countries. Added to this is the present availability of new and comparatively inexpensive exploration tools such as good quality satellite images, self-calibrating and versatile gamma-ray spectrometers, and solid-state fluorimeters. While these technological advances result in noticeable but marginal improvements in the exploration of well developed countries, they make a vast difference in a country where mineral exploration is in its infancy and where, consequently, supporting services are modest and the prospection areas enormous. Some examples are: (a) in some parts of Paraguay, in the absence of any topographical or geographical (let alone geological) map at a scale better than 1:1 000 000, enlargement of satellite images up to 1:250 000 were often used as a standard topographical map and geological traverses were planned directly over them; (b) the same high-resolution gamma-ray spectrometer was used from a light aircraft for reconnaissance work or fitted to a vehicle with an automatic strip recorder for car-borne spectrometry, was used directly in the field for follow-up activity and gridding, and eventually was used in a laboratory under strictly controlled conditions for semi-quantitative determinations of U and Th. Luckily this instrument never broke down (only one was available) and required only minimum maintenance and calibration. Ten years ago such exploration tools were not available and a comparable reconnaissance programme would have been much more costly.

A uranium deposit is seldom found by the application of only one technique but rather by the simultaneous but carefully selective application of several methods. Most of the available uranium exploration tools, as recently reviewed by Dodd [10], were used in the Paraguay reconnaissance, with the exception of radon measurement and geobotany (thought to be unsuited geologically and not very reliable), and drilling (not suitable at this early exploration stage).

Although the approach was fairly diversified the capital cost in equipment was rather low, being contained within a few tens of thousands of dollars.

To better evaluate the applicability of any proposed exploration method special attention was paid to the morphology, soil, climate and vegetation of

TABLE I. TYPES OF URANIUM DEPOSITS AND THEIR RELEVANCE TO PARAGUAY

Type of uranium deposits	Spatial relationship of Paraguay with known deposits	Limiting factors	Priority reconnaissance target	Observations	Priority exploration target
(1) Zoned pegmatities	Unattractive as exploration target.				
(2) Alkaline intrusions	Very good possibilities. Similar occurrences are known in Brazil (Poços de Caldas, Arazá) less than 900 km from Paraguay. Other occurrences in Angola.	Many intrusions are known in Paraguay (more than 40).	Yes	Good radiometric expression, attractive geological location. Optimum definition of exploration targets.	Yes
(3) Carbonatites					
Syngenetic Deposits	(4) Granites	Interesting possibilities. The huge Rössing mine in Namibia is the closest (in geological terms) to Paraguay.	Poor regional range: less than 800 km <sup>2</sup> of Precambrian formations in Paraguay, none of which is particularly promising. Poor exposure.	Yes	It appears that no pegmatoid leucocratic granites are found.
	(5) Dissemination in vulcanites	There are no significant examples in western Gondwana.	Poor exposure.		
	(6) Dissemination in granulites				
	(7) Pyrrhotitic conglomerates	A possibility. The Moeda Formation (Brazil) is only 1100 km away.			
	(8) Argillaceous slates	Of little significance as exploration targets.			
	(9) Phosphates				

TABLE I. (cont.)

Type of uranium deposits	Spatial relationship of Paraguay with known deposits	Limiting factors	Priority reconnaissance target	Observations	Priority exploration target
Epigenetic Deposits	(10) Coal and lignites	A possibility. There are uranium-bearing coal and lignite deposits in the Figuera region of Brazil.	Very limited area suitable for prospection.	Yes	Vague and unlikely target.
	(11) Calcretes	A possibility. The Cosquín deposit in Argentina is probably an orogenic calcrete.	The Argentinian situation is not absolutely identical with that in Paraguay but the possibility of calcretes cannot be discounted.	Yes	Unsuitable morphological and climatological conditions.
	(12) Continental sandstones	A classical and excellent possibility. There are a number of known deposits near Paraguay (400 km), but all are linked to the Andean orogeny.		Yes	Geologically interesting. The Serie de Caacupe is a good target.
	(13) Veins	These deposits are not known to exist near Paraguay.	Fairly poor prospect. These deposits are normally sought in 'polymetallic' exploration campaigns.		

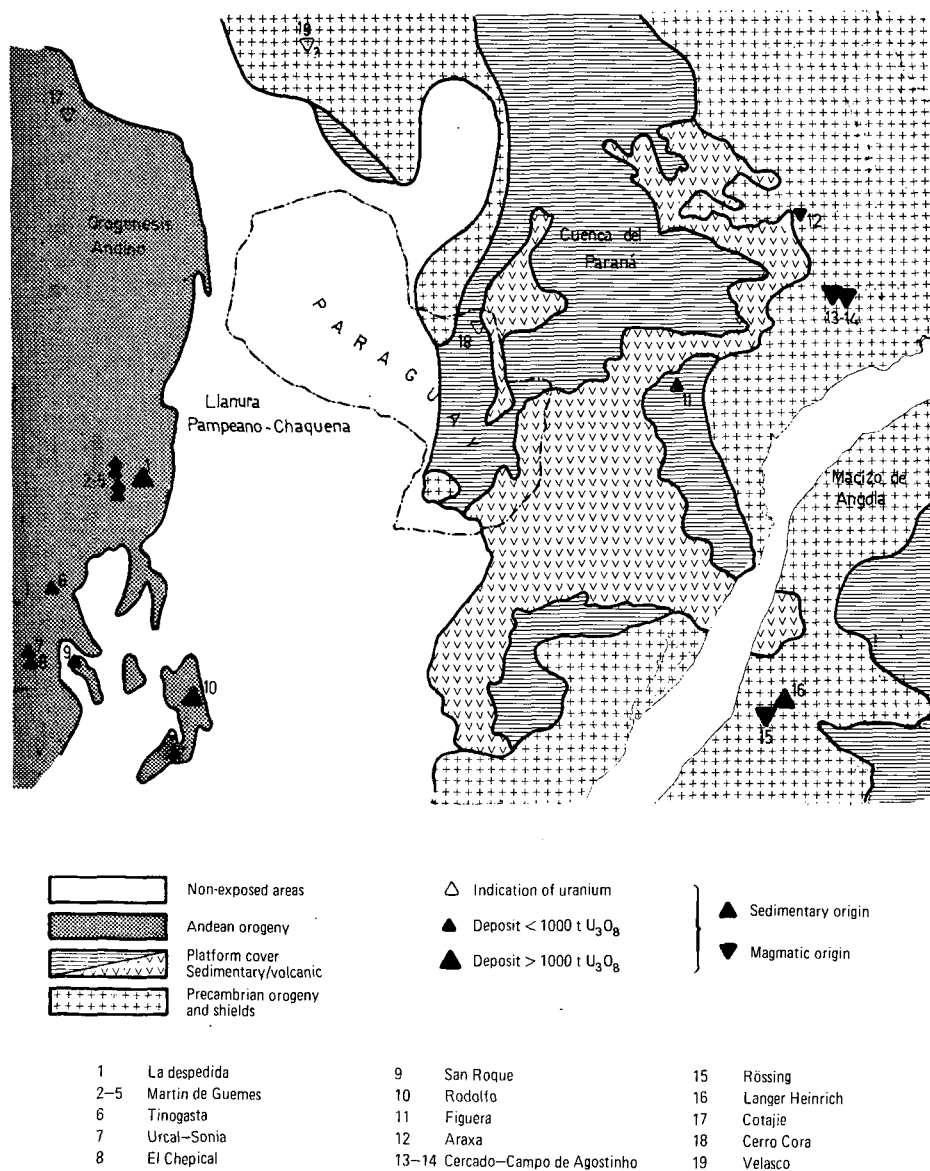


FIG. 3. Spatial relation of Paraguay with other U mineralizations.

Paraguay. Rough but adequate maps for each of the above were compiled a few days before beginning exploration and were routinely consulted.

Strong preference was given to methods directly applicable at reconnaissance level, particularly LANDSAT and air-photo interpretation, 'rim-flight' from light aircraft, car-borne spectrometry, geological reconnaissance and some geochemistry, both of water and rock samples. The accent was invariably put on checking proposed metallogenetic models and in coping with tangible and possibly significant results with a minimum expenditure of time and money. All the personnel were trained to quantify every step of the exploration in cost/effectiveness terms.

A summary of the main exploration activities is as follows:

- (1) *Airborne reconnaissance*: Four sorties totalling 18 flight hours with a high-wing light plane fitted with: (a) one four-channel differential spectrometer; (b) one external sensor NaI 7.6 X 7.6 cm; (c) one single-channel automatic strip recorder; (d) one 35 mm reflex camera 1:24.
- (2) *Car-borne radiometry and reconnaissance*: 11 500 km (most of the road network of Paraguay) of car-borne reconnaissance. Equipment: one 4 X 4 all-terrain military vehicle fitted with (a), (b) and (c) mentioned in item (1), geochemical prospecting kit, three T/C scintillometers, sampling and trenching equipment.
- (3) *Field reconnaissance*: Several sorties of field work totalling 410 man-days: mapping, prospecting, gridding, sampling. A considerable amount of work was carried out by geology students and members of the armed forces.
- (4) *Laboratory work*: One chemist and two assistants working full-time for 4 months at: (1) sample preparation; (2) semi-quantitative differential spectrometry; (3) fluorimetry; (4) mineral identification. The last task absorbed up to 40% of the total time but was of excellent training value. Equipment: (A) one four-channel differential spectrometer with external sensor and lead shield; (B) one solid-state fluorimeter; (C) one microscope; (D) four calibrated U standards; (E) one UV lamp; (F) standard chemical laboratory equipment and reagents.

## RESULTS

After a careful study of all the literature available and a rapid airborne reconnaissance, Paraguay was divided into several geological and morphological regions which were ranked according to their favourability for hosting uranium mineralization. Obviously the thick recent alluvions and the basalts that cover

large parts of the country were given very low priority. In fact, exploration was concentrated from the beginning almost entirely on 130 000 km<sup>2</sup>, or approximately one third of the national territory. At this stage three precise reconnaissance targets were proposed:

- (A) Orthomagmatic U occurrence of 'shield' type (for the space relationship of Paraguay with Poços de Caldas, Araxá, Rössing)
- (B) Uranium in sandstone (a 'classical' exploration target and because of the extension of potential Gondwana formations into Paraguay)
- (C) Uranium in calcretes (because the morphological and climatological conditions of northwest Paraguay looked possibly favourable).

The rather unorthodox target (C) was chosen for its relative ease of investigation on a regional scale, an important factor where exploration is carried out with a minimum of financial outlay. The extensive work of Carlisle [11] on world calcretes being already available, the criteria for U calcrete favourability were rapidly checked in the field, with negative results. Although salt pans and calcretes are indeed occasionally present in the northern part of the Chaco region near the Bolivian frontier, the geological conditions are in no way conducive to uraniferous calcretes or gypcretes. The scant calcrete present proved to be of entirely pedogenic origin and no adequate erosional surfaces as potential U source rock were present in the area. Furthermore, the types of soil, evapo-transpiration coefficients and vegetation strongly suggest inadequate conditions for massive, water-laid calcretes. The loss of money or time in investigating this possibility was minimal and permitted very large areas of western Paraguay to be discarded in favour of the far more promising eastern region.

Checking the possibility of uranium favourability in sandstone, particularly the lower Palaeozoic and upper Mesozoic continental formations outcropping over approximately 10% of Paraguay, proved much more difficult. Undoubtedly the work done during this preliminary mission, consisting of a few car-borne traverses and some geochemical sampling, was inadequate to prove or disprove any uraniferous potential in these formations. The extensive depositional surfaces of Paraguay further complicated the problem and without doubt expensive sub-surface exploration techniques, such as scout percussion drilling and extensive geochemistry, will be necessary for a proper investigation of this target. Nevertheless, some areas of priority have already been delineated. Follow-up work is in progress.

The third target, or uranium of 'magmatic' affiliation, proved to be the most rewarding of the three, at least at the reconnaissance stage. Attention was devoted to precisely localizing intrusive bodies by LANDSAT satellite imagery, the predominantly savannah climate and the morphology of eastern Paraguay being most conducive for this type of study.

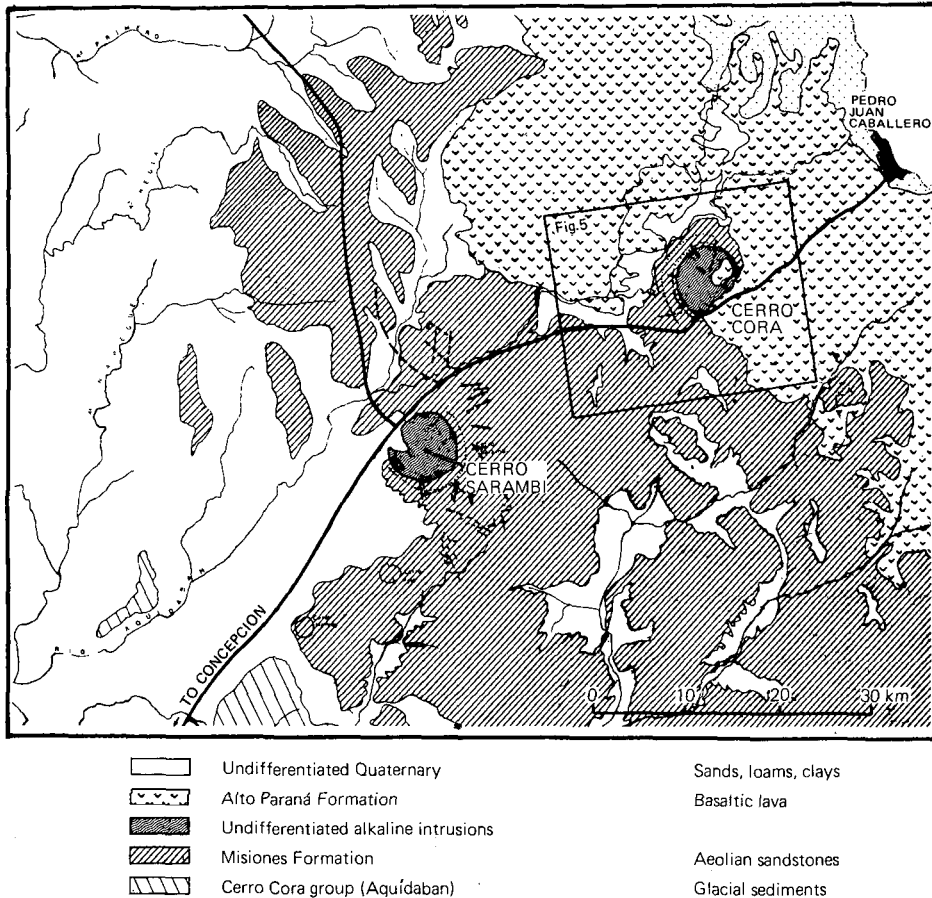


FIG.4. Cerro Cora carbonatite from satellite image.

The outstanding and unmistakable ring structures of the region of Amambay [12] made it an obvious reconnaissance target. The fact that both the Cerro Sarambi and the Cerro Cora structures (see Figs 4 and 5) were cut by the major national highway from Concepción to Pedro Juan Caballero made the use of car-borne radiometry advisable. As thorium is usually associated with highly differentiated igneous bodies [13--15] a differential spectrometer was used. The result of the first car-borne traverse is given in Fig. 6. Besides the obvious total count anomaly, the fact that uranium was much more abundant than thorium was both surprising and promising.

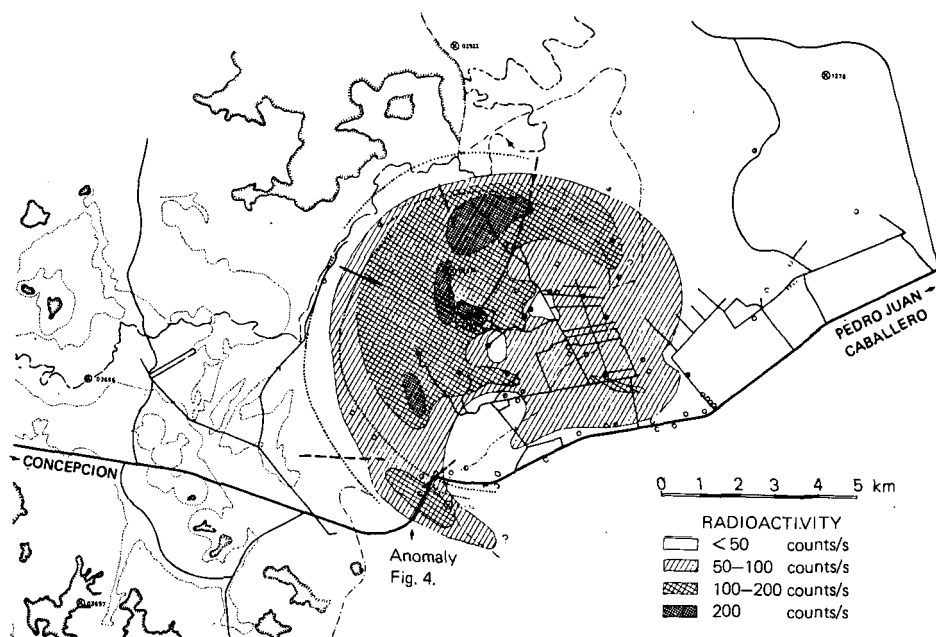


FIG.5. Radiometric expression of Cerro Cora ring structure.

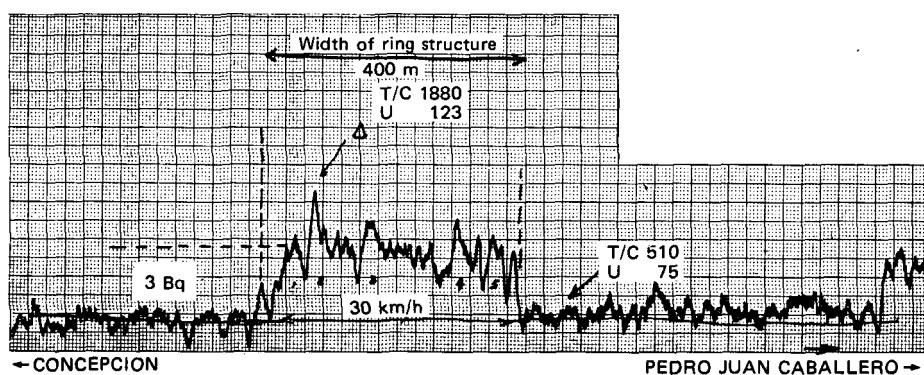
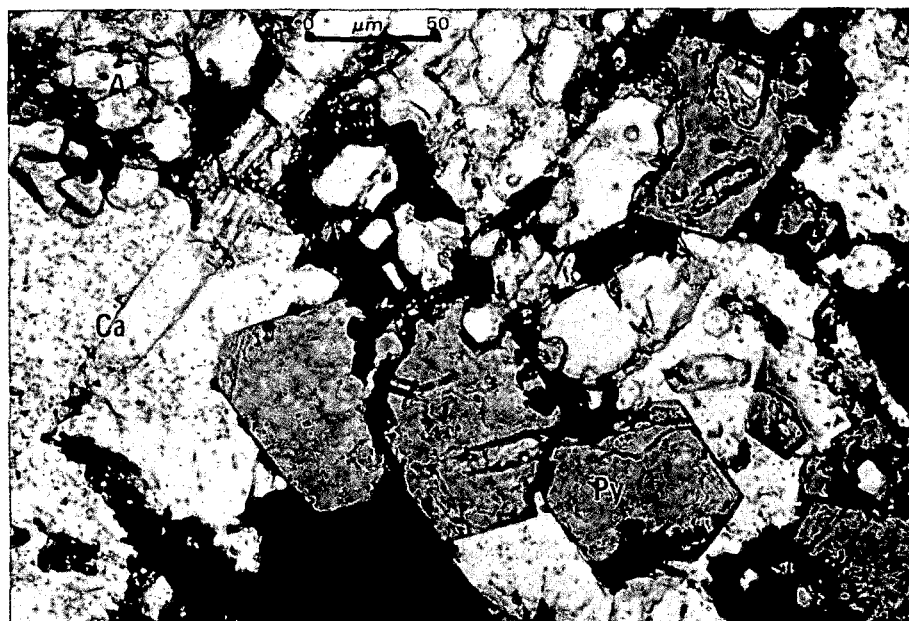


FIG.6. Field-book entry of Cerro Cora car-borne radiometric traverse.  
In this figure T/C = Total counts and U = Uranium channel counts.



#### LEGEND

Uranpyrochlore (Py) with cluster of apatite (A) in clear sövite (Ca) at junction of altered silicates (dark).

*FIG. 7. Thin section of Cerro Cora mineralization.*

However, the Cerro Cora alkaline complex covers approximately 64 km<sup>2</sup> of rather rugged country and because of the urgency of pinpointing a meaningful occurrence at an early stage, further guides to detailed exploration were sought. The model of carbonatites proposed by Ginsburg [16] was selected and detailed reconnaissance was immediately directed toward the centre rather than the border of the intrusion. A strongly radioactive sample was collected in a matter of days. The sample was closely related to a sövite exposure (Fig. 7). The consistently low thorium content and the obviously refractory nature of the uranium mineral (pointing to probable secular equilibrium conditions) made semi-quantitative spectrometric techniques very suitable for uranium determination and, as soon as it became obvious that some mineralization was well above 1000 ppm, U samples were sent to specialized laboratories for precise determination. Lack of drilling at this very early stage of the exploration prevented the collection of economically representative samples and all the data collected so far must be viewed in this light. A radioactive superficial sample collected over a strike of several metres and weighing several tens of kilograms was crushed, homogenized and distributed to various analytical establishments. The results are given in Table II.

TABLE II. MICROPROBE ANALYSIS OF CERRO CORA PYROCHLORE  
(Determinations made by the Commonwealth Scientific and Industrial Research  
Organization (CSIRO) Laboratories, Sydney)

Constituent	Content (%)	Constituent	Content (%)
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	47.8	BaO	4.0
UO <sub>2</sub>	13.3	ThO <sub>2</sub>	0.1
TiO <sub>2</sub>	6.9	PbO	0.9
SiO <sub>2</sub>	6.0	FeO	2.2
CaO	5.2	MnO <sub>2</sub>	1.2
SrO	10.4	K <sub>2</sub> O	0.06
TOTAL: 98.11% (excluding H <sub>2</sub> O)			
Note: Zr, Ta and REE were below the detection limit.			

TABLE III. RELATION BETWEEN URANIUM RESOURCES AND  
SURFACES OF VARIOUS CONTINENTS<sup>a</sup>

Continent	Reasonably assured resources U (t)	Surface (km <sup>2</sup> )	Resources U/surface (kg/km <sup>2</sup> )
Europe <sup>b</sup>	382 600	9 800 000	39
Australia	296 000	7 700 000	38
Africa	588 200	30 300 000	19
North America <sup>c</sup>	829 700	22 100 000	37
South America	60 000	18 200 000	3
Asia <sup>b</sup>	NA	42 700 000	NA

<sup>a</sup> Resources data are taken from 'Uranium', issued by the OECD in 1977 (p. 20, Table III), and include all reasonably assured resources.

<sup>b</sup> Data not available (NA) for countries with centrally planned economies.

<sup>c</sup> Greenland excluded.

## SUGGESTIONS ON SOME URANIUM EXPLORATION METHODS RELEVANT TO LATIN AMERICA

Table III seems to indicate a rather poor concentration of uranium resources in South America. Quite possibly this may be due entirely to geological reasons, and a very unequal global distribution of some metals, namely, Mo, Ni, Co, Sn, etc., is well known [17]. The geology of South America is not, however, very different in its broad outline from the rest of the world, and there is some reason to speculate that the deficiency in uranium resources may be partially due to a less thorough exploration effort and to rather unfavourable climatic and geographical conditions.

In Latin America, where so far no major uraniferous metallogenic province ( $\geq 50\,000$  t of uranium) has been recognized, the first exploration effort should, preferably, be conducted on a regional scale. Two suggestions are made:

- (1) The primary mineral phases of the deposits numbered 1, 2, 3, 4, 5, 12 in Table I are often of the high-temperature refractory type. During erosion and in very dynamic hydrological conditions uraniferous resistates are likely to be mechanically dispersed in the secondary environment. In looking for this particular type of deposit it would perhaps be worthwhile to emphasize heavy mineral geochemistry rather than classical  $U^{+6}$  geochemistry. Some of the uraniferous resistates can conceivably be traced to mineral deposits which are economic in their own right (betafite, U-pyrochlore, uranothorianite, brannerite, baddeleyite, davidite, allanite, etc.), while others (zircon, monazite, xenotime, ilmenite) can possibly be a good guide to syngenetic uranium deposits, or provinces, of igneous origin.
- (2) It seems highly probable that for remote or little known parts of Latin America satellite imagery interpretation will play a very important role in uranium exploration. Its use is threefold:
  - (a) geological mapping at regional scale, or better still, compilation of thematic maps for checking the soundness of the various metallogenic models elaborated
  - (b) direct identification of uranium exploration targets
  - (c) selection of best exploration techniques, taking into account vegetation, soils, hydrography, erosional and depositional surfaces, etc.

Abundant literature is available for points (a) and (c). Point (b) is still very tentative but some limited case histories on the subject do exist [18–20].

In contrast to the LANDSAT exploration techniques used for other metallic commodities, it is suggested that not too much time should be devoted to compilation of 'lineation maps'. The resulting maps are certainly very impressive but from limited experience it has been found that they are of no great help in direct target identification. One possible explanation is that while tectonics undoubtedly play a major role in uranium mobilization and transfer at global scale [21], uranium deposition is by and large more responsive to localized chemical causes. Among the types of uranium deposits likely to have a good LANDSAT expression calcretes, carbonatites and some orthomagmatic differentiations are probably the most promising.

## CONCLUSIONS

The conclusions can be summarized as follows:

- (1) In poorly explored countries, which is certainly the case with vast areas of South America, there are still good possibilities of finding 'easy' uranium occurrences, i.e. occurrences with an obvious superficial and radiometric expression. Such mineralization is increasingly difficult to find in developed countries.
- (2) As pointed out by several authors [2, 22], the exploration effort should be precisely oriented and definite metallogenetic models must be continually elaborated, tested and, in most cases, discarded.
- (3) Selective exploration techniques, not necessarily very sophisticated or expensive, can play a significant role in South America. However, given the variety of morphological, climatological and geological environments an appropriate and optimal combination of prospecting techniques should be specifically tailored. For each specific problem techniques that proved very successful in detecting an orebody on the Brazilian Shield might not detect a comparable orebody nestled in the Andean orogeny, and vice versa. 'Throwing money at the problem' is of no help.
- (4) Although orthomagmatic uranium deposits have never been a favourite exploration target the increasing number of recently developed economic mineralizations in alkaline syenites, granites and carbonatites deserve to be taken into account. This consideration is particularly true for western Gondwanaland where there seems to be an uncommon concentration of such deposits. The possible extension into Bolivia of the Brazilian-Paraguayan belt of uraniferous carbonatites deserves some attention. In Table IV some tentative correlations are proposed.

TABLE IV. TENTATIVE CORRELATION BETWEEN THREE PROVINCES OF RING STRUCTURES IN SOUTH AMERICA

	BRAZIL (Minas Gerais) [23, 24]	PARAGUAY (Amambay) [23]	BOLIVIA (Velasco) [25]
Type of occurrence	Five ring structures 2–12 km diameter: Catalao, Salitre, Serra Negra, Araxá, Tapira	Two ring structures 8–10 km diameter: Cerro Cora, Cerro Sarambi (possibly more)	Six ring structures 2–12 km diameter
Intruded formation	Basement complex – gneiss	Palaeo-Mesozoic sedimentary formations directly underlain by base- ment complex – gneiss and micaschists	Basement complex – gneiss
Magmatic affiliation	Carbonatite	Carbonatite	Suspected carbonatite
Age	Cretaceous-Tertiary	Cretaceous-Tertiary	?
Tectonic setting	Anorogenic, intracontinental	Anorogenic, intracontinental	Anorogenic, intracontinental
Recognized radio- active minerals	Pyrochlore, U-Ba pyrochlore, abdomophanite, goyazite, monazite	U-Ba-Sr pyrochlore, apatite	Pyrochlore? Ba-pyrochlore? apatite, florencite? zircon
Economic interest	Phosphates, niobium uranium? titanium?	Niobium? uranium?	Niobium?

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are greatly indebted to J. Knopfelmacher and N. Gonzalez Romero for their constant support in the most difficult phases of both field and administrative work. Special thanks are due to J. McAndrew of the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Sydney, for his inspiring advice on some aspects of uranium metallogeny and mineralogy.

## REFERENCES

- [1] BELLUCO, A., et al., "Bases para la prospección uranífera de la República Argentina", Recognition and Evaluation of Uraniferous Areas (Proc. Tech. Comm. Meeting Vienna, 1975), IAEA, Vienna (1977) 183.
- [2] DAHLKAMP, F.G., "Uranium exploration techniques – their applicability and limitation", Uranium Supply and Demand, The Uranium Institute, London (1977).
- [3] MACIEL, A.C., CRUZ, P.R., Perfil Analítico do Urânio, Ministério das Minas e Energia, Brasília, Bol. 27 (1973).
- [4] STIPANICIC, P.N., "Conceptos geoestructurales generales sobre la distribución de los yacimientos uraníferos con control sedimentario en la Argentina y posible aplicación de los mismos en el resto de Sudamérica", Uranium Exploration Geology (Proc. Panel Vienna, 1970), IAEA, Vienna (1970) 205.
- [5] RUSIKA, V., "New sources of uranium? Types of uranium deposits presently unknown in Canada", Uranium Exploration 75, Geol. Surv. Can., Paper 75–26 (1975).
- [6] ZIEGLER, V., "Essai de classification métallogénétique des gisements d'uranium", Formation of Uranium Ore Deposits (Proc. Symp. Athens, 1974), IAEA, Vienna (1974) 661.
- [7] DAHLKAMP, F.G., "Geochronological – metallogenetic correlation of uranium mineralization", Recognition and Evaluation of Uraniferous Areas (Proc. Tech. Comm. Meeting Vienna, 1975), IAEA, Vienna (1977) 131.
- [8] McMILLAN, R.H., "Metallogenesis of Canadian uranium deposits", Geology, Mining and Extractive Processing of Uranium, Institute of Mining and Metallurgy, London (1977).
- [9] NININGER, R.D., "Recognition of uranium districts", Recognition and Evaluation of Uraniferous Areas (Proc. Tech. Comm. Meeting Vienna, 1975), IAEA, Vienna (1977) 1.
- [10] DODD, P.H., "Uranium exploration technology", Geology, Mining and Extractive Processing of Uranium, Institute of Mining and Metallurgy, London (1977).
- [11] CARLISLE, D., The Distribution of Calcretes and Gypcretes in Southwestern United States and their Uranium Favorability, University of California, Special Report prepared for the United States Department of Energy (1978).
- [12] ANON., Cuenca de la Plata – Estudio para su planificación y desarrollo, República del Paraguay: Proyecto Aquidaban, Secretaría General de los Estados Americanos, Washington, DC (1975).
- [13] SORENSON, H., "Occurrences of uranium in alkaline igneous rocks", Uranium Exploration Geology (Proc. Panel Vienna, 1970), IAEA, Vienna (1970) 161.
- [14] ARMSTRONG, F.C., "Uranium occurrences of the future – "porphyry" uranium deposits", Formation of Uranium Ore Deposits (Proc. Symp. Athens, 1974), IAEA, Vienna (1974) 625.
- [15] von BACKSTRÖM, J.W., "Other uranium deposits", Formation of Uranium Ore Deposits (Proc. Symp. Athens, 1974), IAEA, Vienna (1974) 605.
- [16] SMIRNOV, V.I., Geology of Mineral Deposits, Mir Publisher, Moscow (1976) (English translation).
- [17] GOVETT, G.J.S., GOVETT, M.H., World Mineral Supplies, Elsevier, Amsterdam (1976).
- [18] VINCENT, R.K., Uranium exploration with computer-processed LANDSAT data, Geophysics 42 3 (1977) 536.
- [19] OFFIELD, T.W., "Remote sensing in uranium exploration", Exploration for Uranium Ore Deposits (Proc. Symp. Vienna, 1976), IAEA, Vienna (1976) 731.
- [20] GABELMAN, J.W., "Remote sensing in uranium exploration", Recognition and Evaluation of Uraniferous Areas (Proc. Tech. Comm. Meeting Vienna, 1975), IAEA, Vienna (1977) 251.
- [21] GABELMAN, J.W., "Orogenic and taphrogenic uranium concentration", Recognition and Evaluation of Uraniferous Areas (Proc. Tech. Comm. Meeting Vienna, 1975), IAEA, Vienna (1977) 109.

- [22] BAILLY, P.B., "Exploration methods and requirements", Surface Mining, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc. (AIMMPE), New York (1968) (A volume in the Seeley W. Mudd Series).
- [23] PREMOLI, C., Prospección de Uranio, Technical Assistance Report No. 1412, IAEA, Vienna (1978).
- [24] PUTZER, H., Metallogenetische Provinzen in Südamerika, E. Schweizerbartische Verlagsbuchhandlung, Stuttgart (1976).
- [25] FLETCHER, C.J.N., et al., "Tin in eastern Bolivia?", International Tin Symp. La Paz, 1977.

## DISCUSSION

J.A. FERNANDEZ: I would like to ask whether you attribute uraniferous potential to the Paraguay Palaeozoic (which differs from the Paraná basalts) only as a result of climatic conditions or for litho-stratigraphic and source reasons as well?

C. PREMOLI: Definitely so, there is an excellent uraniferous potential in several sedimentary formations of Paraguay. There is a lot of interest in them by both government and private sectors and exploration is actively going on. Still, it would be unrealistic to expect short-term results: the evaluation of the potential of sedimentary formations can take years and it is a rather expensive operation as sub-surface methods are necessarily involved. Given the limited time and money of the programme described, we put some emphasis on mineralizations likely to have an easily detectable surface expression. The fact that we did not detect any significant anomaly on the Palaeomesozoic sedimentary formations does not rule out the potential.

R.J. WRIGHT: You mentioned, Mr. Premoli, the use of satellite imagery in the identification of circular structures. I would like to ask whether you have found imagery useful in any other way for uranium exploration.

C. PREMOLI: In Paraguay we have been very lucky and I do not want to give the impression of exaggerating the role of LANDSAT imagery in uranium exploration. I have found it useful for some types of uranium deposits in rather unexplored countries and in good climatic conditions. Here my views are maybe at slight variance with other authors. For instance, I do not attach great significance to 'lineation maps' in uranium exploration, nor do I believe that sedimentary uranium can be very effectively explored by LANDSAT. But maybe LANDSAT can be useful, for instance, for orthomagnetic deposits, particularly ring structures. We have prepared some notes on LANDSAT applicability for uranium exploration and I will be happy to pass them over to you.

P.M. BARRETTO: Mr. Velázquez indicated that the original working hypothesis was to look for uranium mineralization of (a) orthomagmatic origin, (b) sedimentary origin and (c) calcrete type. Have you observed any evidence for calcrete-type mineralization in Paraguay?

C. PREMOLI: No, the field evidence has been totally negative and in a few days reconnaissance we were able to discard conclusively this possibility. With a minimum of expense a very large portion of Paraguay was eliminated as exploration target. Calcretes were tentatively selected at the very beginning of the exploration because of the semi-desert condition of the Chaco, its endoreic drainage and its cratonic stability. Indeed some small evaporite pans do form in the northern Chaco. Unfortunately, the surrounding exposures are far too small and unpromising to be considered likely source rocks for uraniferous calcretes. The vulcanites reported at the Bolivian frontier were simply not there. And there were other negative aspects, too.

# PROGRAMA NACIONAL DE DESARROLLO DE LOS RECURSOS URANIFEROS DE LA ARGENTINA

F. RODRIGO

Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA),  
Buenos Aires

A.E. BELLUCO

Experto del OIEA,  
CNEA,  
Cruz, Mendoza,  
Argentina

## Abstract-Resumen

### NATIONAL URANIUM DEVELOPMENT PROGRAMME IN ARGENTINA.

The initial survey of Argentine uranium resources was completed in 1959. This survey, conducted over a 12-year period, covered approximately 1 000 000 square kilometres. The exploration programme used a combination of airborne, carborne, and hand-held radiometric surveys, together with supporting geochemical and emanometric evaluations. Nearly 1000 anomalies were found, and of these 500 were selected for further study. This work included detailed geological, radiometric and emanometric surveys, as well as 230 000 metres of drilling and 35 000 metres of trenching and tunnelling. As a result 200 of the anomalies were reclassified as deposits of four different size categories. Eighty of the deposits were estimated to contain 10 tonnes  $U_3O_8$ , 15 were placed in the 100 tonnes  $U_3O_8$  category, 7 were designated as 1000 tonnes deposits, and one was estimated to contain approximately 16 000 tonnes of  $U_3O_8$ . The uranium resources of Argentina are presently estimated to be 31 000 tonnes  $U_3O_8$ , based on a cost of up to US \$80 per kilogram  $U_3O_8$ . An additional 12 000 tonnes  $U_3O_8$  are available if a US \$80–130 per kilogram  $U_3O_8$  cost category is used. The overall uraniferous geological potential based on favourability criteria is estimated to be around 400 000 tonnes  $U_3O_8$ .

### PROGRAMA NACIONAL DE DESARROLLO DE LOS RECURSOS URANIFEROS DE LA ARGENTINA.

La investigación inicial de los recursos uraníferos de la Argentina quedó terminada en 1959. Esta investigación se ejecutó durante un período de 12 años y cubrió una extensión aproximada de 1 000 000 de km<sup>2</sup>. El programa de exploración comprendió investigaciones combinadas con vehículos de motor y con instrumentos manuales, además de evaluaciones auxiliares geoquímicas y emanométricas. Se hallaron alrededor de 1000 anomalías, de las cuales se seleccionaron 500 para su estudio ulterior. Estos trabajos incluyeron investigaciones detalladas geológicas, radiométricas y emanométricas, así como 230 000 m de sondeos y 35 000 m de zanqueo y galerías. Esto permitió reclasificar 200 de las anomalías como yacimientos de cuatro categorías diferentes por su tamaño. Se estimó que ochenta de los

yacimientos contenían 10 t de  $U_3O_8$ , quince fueron clasificados en la categoría de 100 t de  $U_3O_8$ , siete se consideraron yacimientos de 1000 t, y uno se calculó que contenía aproximadamente 16 000 toneladas de  $U_3O_8$ . Actualmente, los recursos uraníferos de la Argentina se estiman en 31 000 t de  $U_3O_8$ , tomando como base un costo de dóls. 80 por kg de  $U_3O_8$ . Si se supone un costo de dóls. 80–130 por kg, hay disponibles 12 000 t más de  $U_3O_8$ . El potencial total geológico uranífero se estima basándose en los criterios de favorabilidad en unas 400 000 t de  $U_3O_8$ .

## 1. INTRODUCCION

Los primeros estudios sobre yacimientos uraníferos se iniciaron en el país en 1938, con la revisión de algunas pegmatitas radiactivas de Córdoba y San Luis, llevada a cabo por varias entidades estatales.

Desde 1950, la Universidad Nacional de Cuyo, en colaboración con la entonces Dirección Nacional de Energía Atómica, continuó con la exploración más intensiva de yacimientos de discreto interés, hasta que en 1956 el total de las actividades se concentró en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Durante 1957 y 1958 integró ésta el plantel de profesionales y técnicos e inició la adquisición de los equipos y el instrumental básico destinados a tales trabajos.

El año 1961 señala el comienzo de los trabajos orgánicos y amplios de prospección, exploración, evaluación y desarrollo de técnicas de beneficio de minerales, realizados con un criterio económico, teniendo fundamentalmente en cuenta el costo final del concentrado a producirse de cada yacimiento.

Paralelamente, ya a mediados de la década del 50, se inician actividades de producción de concentrados, purificación nuclear y obtención de uranio metálico, en una escala adecuada para sostener las actividades de investigación y desarrollo de la CNEA.

La consolidación de este ciclo se concreta en 1970, al asumir la CNEA la responsabilidad del abastecimiento de uranio para el programa de centrales nucleares, el cual se inició con la entrega de la primera partida de 50 t de  $U_3O_8$  (42,5 t de U), destinada a la elaboración del combustible para la carga inicial de la central nuclear de Atucha.

## 2. SELECCION DE AREAS Y PROSPECCION

Los trabajos de prospección, exploración y desarrollo de minerales de uranio que realiza la CNEA en la Argentina, se apoyan en los estudios de favorabilidad geológica y selección de áreas expuestos por A.E. Belluco en esta misma publicación (IAEA-AG-162/14).

La primera selección de áreas de interés uranífero fue elaborada en 1959, estableciéndose que más de 1 000 000 km<sup>2</sup> del territorio argentino ofrecía condiciones geológicas favorables.

Doce años de actividad continuada, especialmente en el campo de reconocimientos geológicos específicos y prospección geoquímica y aérea, se vió reflejada en el hallazgo de unas 1000 anomalías, de las cuales se recomendaron y verificaron en el terreno unas 500.

El conocimiento alcanzado y la clasificación y evaluación individual de cada anomalía en su contexto geológico permitió en 1972 actualizar la selección de áreas de interés, la determinación de "Unidades de prospección", con características particulares y su agrupamiento en "Ambientes geológicos regionales", con condiciones geológicas comunes, cuya síntesis se expone en la Fig.1.

Las áreas de interés totalizan unos 900 000 km<sup>2</sup>, de los cuales 250 000 km<sup>2</sup> se consideran con prioridad mayor.

Los programas de prospección y exploración, regulados hasta el presente por estrictas condiciones locales de demanda interna y capacidad operativa, se distribuyen equilibradamente en las etapas de estudio de geología del uranio, prospección y exploración física, en un reducido número de distritos de interés.

La prospección, especialmente aérea, con un aporte moderado de geoquímica en sectores de condiciones diferenciales favorables a esta técnica, se realiza sobre grandes ambientes, con superficies del orden de 100 000 km<sup>2</sup> y secuencias de desarrollo de uno a dos años.

El primer programa de esta serie, actualmente en etapa de finalización de vuelos, cubre la altiplanicie central de la Patagonia (parte norte de la provincia de Santa Cruz y central de la de Chubut), en la que afloran sedimentos continentales, subhorizontales, poco disturbados, preferentemente del Jurásico y Cretácico, con escasa participación de términos carboníferos y del Terciario Inferior (Fig.2).

La prospección aérea fue contratada como un servicio a una empresa aerofotogramétrica local que recibe asistencia técnica e instrumental de una compañía canadiense. Se aplica espectrometría gamma (U, Th, K y  $\gamma$  total), sin magnetometría.

Se prevé iniciar un programa similar en la región central del país (Sierras Grandes de Córdoba) en el año próximo.

### 3. EXPLORACION FISICA

La escala de los trabajos de exploración física que realiza la CNEA puede quedar definida por unos 35 000 m de labores mineras subterráneas y 230 000 m de perforación totales, realizados hasta el presente. De ellos, aproximadamente



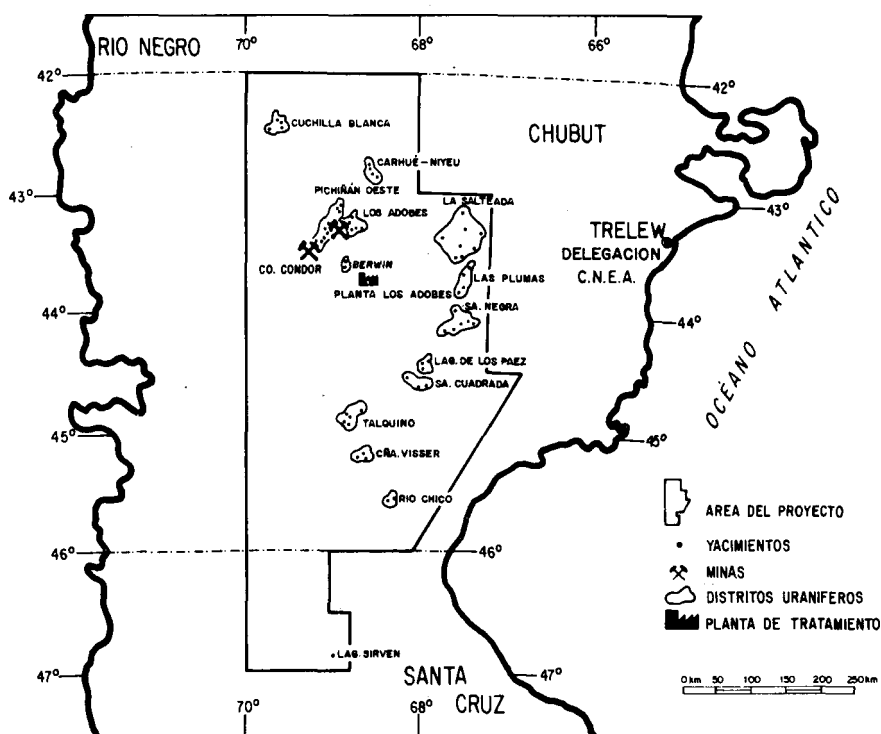


FIG.2. Proyecto Patagonia. Desarrollo y producción de uranio.

dos tercios de las labores mineras y la mitad de los sondeos fueron ejecutados directamente por la CNEA. En el presente año se completarán 45 000 m de sondeos.

Los trabajos citados pusieron en evidencia unos 200 yacimientos de uranio, de dimensiones variables, de los cuales y en el grado de desarrollo actual, ochenta poseen reservas individuales de más de 10 t de  $U_3O_8$ , quince de ellos más de 100 t de  $U_3O_8$  cada uno, siete más de 1000 t de  $U_3O_8$  y uno, el más explorado ("Tigre I - La Terraza") tiene 16 000 t de  $U_3O_8$ .

Estos yacimientos se agrupan en más de 20 distritos uraníferos principales (Fig.3).

Actualmente la CNEA ejecuta trabajos de prospección y exploración en los siguientes distritos:

- Area de Terciario subandino (Salta y Jujuy)
- Distrito Tonco (Salta)
- Sierras de Córdoba
- Valle de Conlara (San Luis)

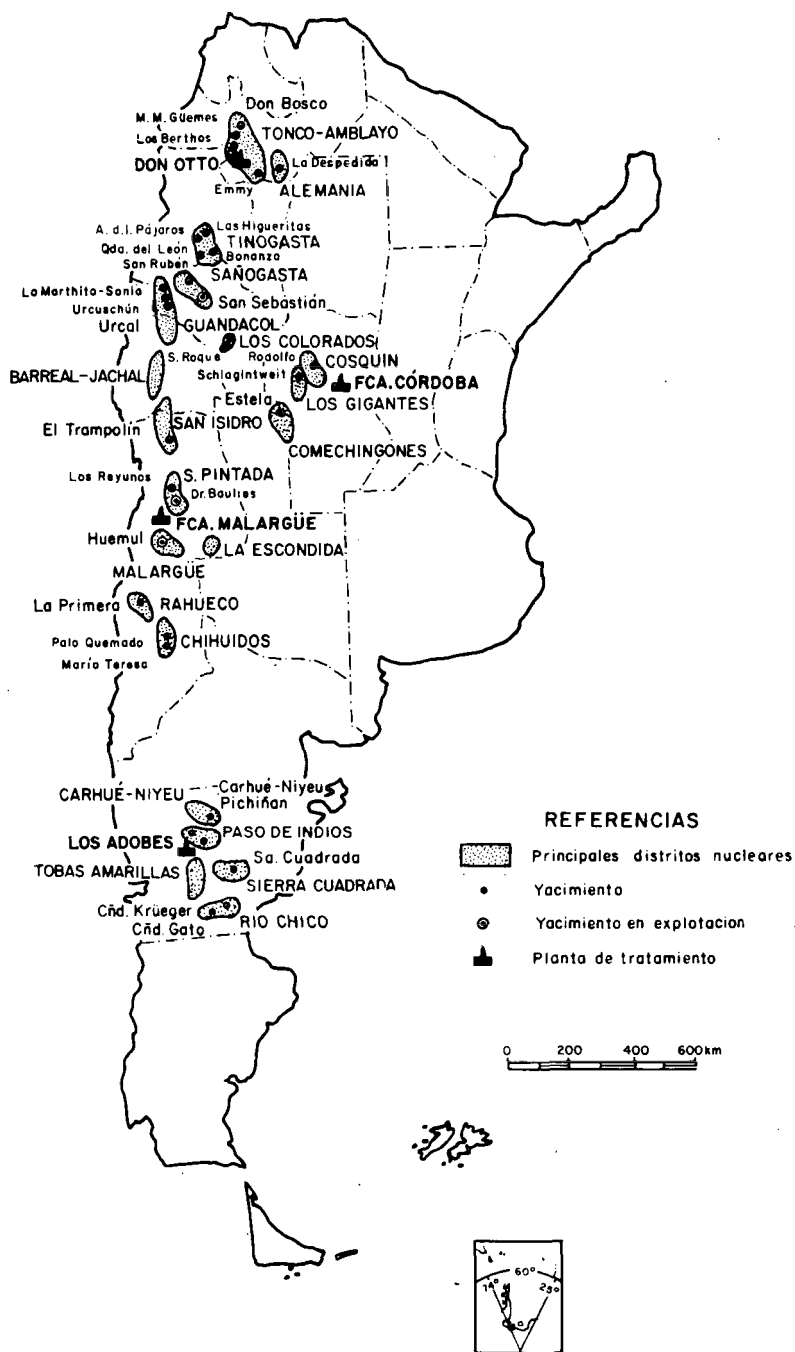


FIG.3. Principales distritos y yacimientos uraníferos.

- Distrito Sierra Pintada, San Rafael (Mendoza)
- Distrito Los Chihuidos (Neuquén)
- Proyecto Patagonia (Chubut y Santa Cruz)

y de producción minera en los siguiente yacimientos:

- “Don Otto” (Salta)
- “Tigre III”, Sierra Pintada (Mendoza)
- “Cerro Cóndor” (Chubut)
- Distrito “Los Gigantes”, Córdoba (Programa en licitación, para la producción de un mínimo de 100 t de  $U_3O_8$ /a y desarrollo de reservas adicionales en un “área de contrato” de 100 km<sup>2</sup>).

#### 4. PRINCIPALES DISTRITOS Y YACIMIENTOS URANIFEROS

Las características de los principales distritos y yacimientos explorados son las siguientes:

##### 4.1. Distrito Tonco-Amblayo (Salta)

Se encuentra a 150 km al OSO de la ciudad de Salta y comprende una serie de cuerpos uraníferos distribuidos en una zona de 90 km de extensión N-S y 60 km E-O, la mayoría de los cuales fueron descubiertos mediante prospección aérea en 1959 (Fig.4).

El emplazamiento se corresponde con el borde sudoccidental de la cuenca del Sistema de Salta (Cretácico-Terciario), en el que se interdigitan sedimentos continentales, con algunos episodios marinos. Próximo al mismo se encuentra el macizo granítico de Cachi, con abundantes pegmatitas con uranio, el que se postula como roca de aporte.

En profundidad, la mineralización (*uraninita*) se emplaza en términos pelíticos, expandiéndose próximo a la superficie en las areniscas contiguas (*carnotita*, *tyuyamunita*, *metaautunita*, *autunita*, *fosfuranilita* y otros).

El yacimiento es el de “Don Otto”, que presenta una mineralización continua en superficie y en una zona decolorada (bleaching), a lo largo de 2500 m, con 3 bancos mineralizados de hasta 1 m de espesor cada uno y leyes medias de 0,8 a 1,5‰ de  $U_3O_8$ .

Se han realizado hasta el presente más de 12 000 m de labores subterráneas y 4000 m de sondeos, lo que documenta la mineralización hasta más de 200 m de profundidad.

Del yacimiento “Don Otto” ya se han extraído más de 300 000 t de mineral, que serán tratadas por el método de lixiviación en pilas por vía ácida.

Le sigue en importancia el yacimiento “Los Berthos”, de 2000 m de desarrollo superficial, en el que se han realizado cerca de 5000 m de labores

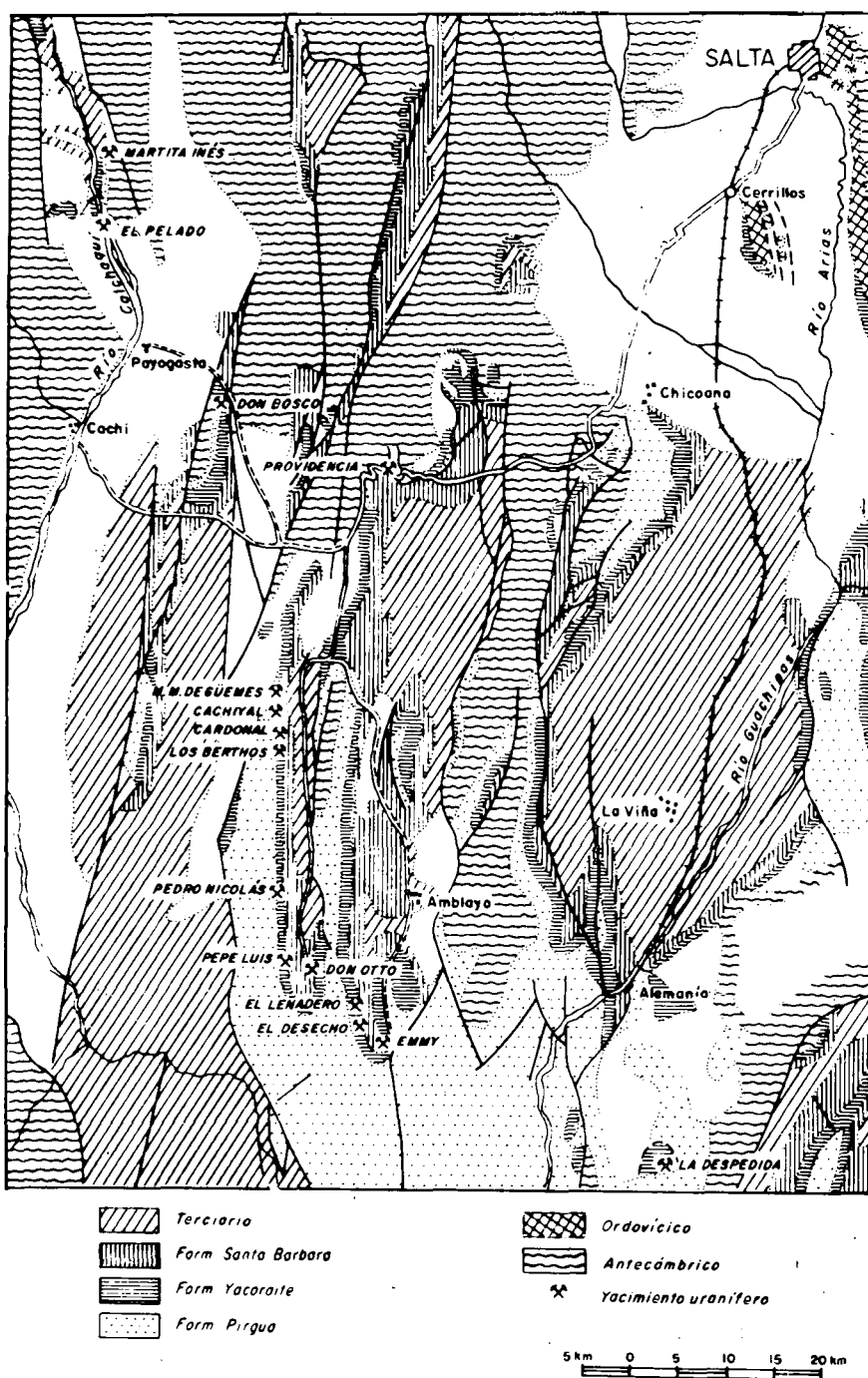


FIG.4. Distrito uranifero Tonco.

mineras y 5000 m de sondeos. Contiene numerosos cuerpos mineralizados con leyes superiores a 1,5‰ de  $U_3O_8$ .

En el extremo norte del valle del Tonco se encuentra el yacimiento "Martín M. de Guemes", con un desarrollo de 300 m, y explorado mediante sondeos hasta 50 m de profundidad. Tiene espesores útiles superiores a 1 m y leyes medias de 1,3‰ de  $U_3O_8$  y 5‰ de  $V_2O_5$ ; con predominio de *carnotita* y *tyuyamunita*.

Otro yacimiento de este distrito ("Pedro Nicolás") se reconoció con escasos laboreos y otros simplemente con trincheras superficiales ("Pepe Luis", "Don Bosco", "Emmy", "Providencia", etc.).

Las reservas alcanzan unas 2000 t de  $U_3O_8$ .

#### 4.2. Distrito Tinogasta (Catamarca)

Comprende una serie de manifestaciones de tipo filoniano emplazadas en granitos del Devónico ("Agua de los Pájaros" y otras) y una conspicua mineralización muy difundida, en un intervalo guía regional de pelitas y calcilitas ("Faja Decolorada"), con el que culminan depósitos continentales del Pérmico. La mineralización en superficie está constituida por *carnotita* y *autunita*, con óxidos de cobre y *uraninita* en profundidad.

La "Faja Decolorada" aflora en dos extensas áreas. En la oriental, conocida desde hace varios años (minas "Las Higuieritas", "Bonanza", "Río Colorado", etc.), los cuerpos, muy discontinuos, raramente alcanzan los 200 m de extensión, con espesores medios del orden de 1 m y leyes del 0,5‰ de  $U_3O_8$ . En el sector occidental (Qda. de la Alumbreira), desarrollada recientemente por la CNEA (minas "Quebrada del León", "Quebrada del Zaguán", "El Sillón" y "Quebrada del Medio"), los cuerpos son de mayor desarrollo (hasta 600 m), con leyes medias del orden de hasta un 0,8‰ de  $U_3O_8$ .

Las dificultades de acceso han limitado el desarrollo de este distrito, que se extiende hacia el sur hasta la provincia de la Rioja (mina "Florentino Ameghino").

#### 4.3. Distrito "Los Gigantes" (Córdoba)

Este Distrito, enclavado en las Sierras Grandes, en la provincia de Córdoba, está vinculado a un sistema regional de fallas que provocó la configuración actual de la Sierra de Los Gigantes. En toda la zona existen cuerpos graníticos devónicos fértiles en uranio (con contenidos de hasta 10 ppm de U) cuya alteración y lixiviación por procesos meteóricos provocó la movilización del uranio y su depositación en las zonas fuertemente fracturadas y alteradas, a lo largo de las fallas principales, en las áreas de conjunción con un sistema secundario de fallas.

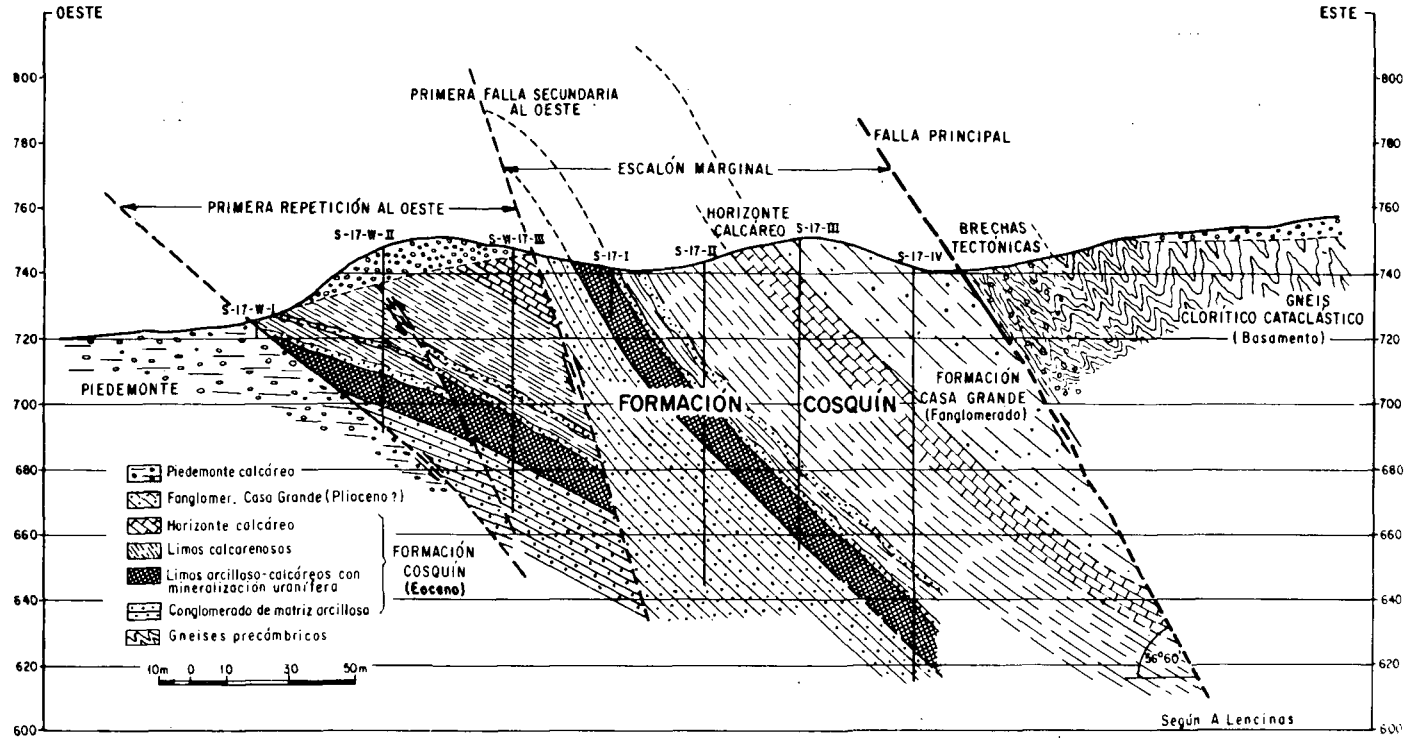


FIG.5. Perfil del yacimiento Rodolfo (Cosquín, Córdoba).

Se atribuye la lixiviación a soluciones carbonatadas o bicarbonatadas y la precipitación del uranio por acción del fósforo liberado de los granitos. El carácter supergénico es reforzado por la presencia de minerales exclusivamente “amarillos” (*autunita*, *metaautunita*, *fosfuranilita*, etc.).

Los yacimientos más importantes son “Schlaginweit”, “Dr. Olsacher”, “Don Goyo”, “La Morenita”, etc., y la mineralización de uranio se aloja tanto en el sistema de fracturas como en el seno de la roca granítica alterada, hasta unos 35 m de profundidad, en forma de “amás” de grandes dimensiones. En el yacimiento “Schlaginweit” se realizaron del orden de 15 000 m de sondeos del tipo “wagon drill” y se certificaron 1400 t de  $U_3O_8$  con leyes medias bajas (0,3% de  $U_3O_8$ ), aunque con posibilidades de recuperación económica, dadas la simpleza de su explotación minera (cantera a cielo abierto) y la facilidad de extracción del uranio (lixiviación en pilas).

La CNEA lanzó a licitación un sector de “Los Gigantes”, operación que engloba la producción inmediata de 100 t de  $U_3O_8$ /a, sobre la base de las reservas certificadas en uno de los yacimientos (Schlaginweit) y el incremento de las mismas en el “área de contrato” (100 km<sup>2</sup>).

#### 4.4. Distrito Cosquín (Córdoba)

Se encuentra en el valle de Punilla, desde el lago San Roque hasta las cercanías de La Cumbre, con un desarrollo superior a 30 km, donde afloran sedimentos continentales del Eoceno (Formación Cosquín), a los que suceden areniscas y conglomerados del Plioceno, próximos a una fractura regional inversa que provocó el ascenso de esquistos precámbricos (Sierra Chica de Córdoba). Inmediatamente al oeste se encuentran granitos devónicos fértiles en uranio (Sierras Grandes, Los Gigantes).

La mineralización, exclusivamente de especies “amarillas” hasta 150 m de profundidad, (*carnotita* y *tyuyamunita*), se emplaza en bancos arcillosos y limos areno-amarillentos, con cemento calcáreo, y se vincula su génesis tanto a un posible aporte singenético, como a una componente diagenética, a partir de la lixiviación de los granitos próximos.

El yacimiento fue reconocido en superficie a lo largo de 10 km. Se exploró su extremo sur, en un tramo de 5 km, con unos 15 000 m de sondeos, hasta profundidades máximas de 150 m (Fig.5).

La mineralización, con un espesor del orden de 6 m en superficie y leyes del 0,4 al 0,6% de  $U_3O_8$ , continúa en profundidad, constituyendo de dos a tres cuerpos superpuestos con espesores de 1 a 2 m cada uno y leyes próximas al 1% de  $U_3O_8$ .

Las reservas certificadas superan las 3300 t de  $U_3O_8$ , de las cuales 1400 alcanzan un tenor del 0,90% de  $U_3O_8$ .

#### 4.5. Distrito Guandacol (La Rioja)

Se sitúa a unos 30 km al oeste de Guandacol y comprende tres tipos de yacimientos:

- a) Mineral de uranio (*uraninita*, *carnotita*, *uranofano*, etc.) diseminado en areniscas de edad carbonífera, asociado con troncos y restos carbonosos. Constituye cuerpos de poco volumen pero de muy alta ley, profusamente distribuidos a lo largo de 150 km.
- b) Mineral de uranio en bancos de areniscas, igualmente carboníferas y con materia orgánica finamente diseminada. En C<sup>o</sup> Urcuschun, se documentó su continuidad por unos 900 m de longitud, con espesores superiores a 1 m y leyes de hasta 1,5‰ de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>.
- c) Mineral de uranio rellenando fracturas o zonas de discontinuidad física, dentro de calcáreos del Paleozoico Inferior. Constituye cuerpos de dimensiones moderadas (hasta 50 m de longitud), con leyes medias elevadas (hasta un 5,5‰ de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>).

#### 4.6. Distrito de Comechingones (San Luis)

En la vertiente occidental de la Sierra de Comechingones se presentan numerosas estructuras filonianas con minerales de uranio (*uraninita*, *gummita*, *uranofano*, etc.), con ganga de *fluorita* fétida, alojados en granitos devónicos (continuación de los de Sierra Grande). Minas: "La Estela", "Bella Vista", "El Repecho", "La Cuesta", etc. En "La Estela" poseen leyes medias del 1‰ de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>.

Enclavado entre la Sierra de Comechingones y la de San Luis (al oeste) se encuentra el valle intermontano de Conlara, rellenado por sedimentos terciarios, producto de la destrucción de ambas sierras. Desde tiempos pliocenos, el valle se comporta como una cuenca semicerrada, postulándose un aporte de uranio por aguas meteóricas que lo lixivian del entorno y del que participan granitos fértiles (hasta 16 ppm de U). En el borde occidental se conocen mineralizaciones de uranio en calcáreos de edad incierta (Santa Rosa). Actualmente se investigan las posibilidades uraníferas del valle de Conlara.

#### 4.7. Distrito de Malargue (Mendoza)

Corresponde a un área de 150 km<sup>2</sup>, situada a 45 km al SO de Malargue, con varios yacimientos cuprouraníferos peneconcordantes en sedimentos continentales del Cretácico Superior. La mineralización se emplaza en bancos psefíticos y psamíticos, interestratificados con arcillas rojas. En la zona superior aparecen *carnotita*, *tyuyamunita*, *sengrerita*, *uranofano* y otros, y en profundidad *uraninita* y polisulfuros.

En la mina Huemul se explotó un cuerpo con 100 m de longitud en el afloramiento y 360 m de profundidad, con un espesor medio de 1,5 m, con minerales de uranio (2,00‰ de  $U_3O_8$ ) y cobre (2% de Cu).

En "Arroyo Seco" existen dos cuerpos, de los cuales el mayor tiene 300 m de largo. En "Agua Botada" se explotaron cinco cuerpos superpuestos en distintos niveles, de los que el 4° fue el más importante con un desarrollo de 600 m y espesores de 1 m (Fig.6). La ley media del mineral fue del 1,8‰ de  $U_3O_8$  y un 9‰ de Cu.

La mina Huemul, que fue explotada por la CNEA, abasteció durante varios años a Fábrica Malargue, a un ritmo de 20 000 t/a. Quedan algunos cuerpos insuficientemente explorados.

#### 4.8. Ambiente del Chubut Central (Proyecto Patagonia)

Agrupa varios distritos uraníferos, con unos 50 indicios mineralizados descubiertos mediante prospección aérea en sedimentos continentales sub-horizontales de varias cuencas sobreimpresas del Mesozoico y Terciario, las que en el norte se adosan o cubren parcialmente el Macizo Norpatagónico (con granitos pérmicos) y, en el sur, las áreas positivas del Macizo del Deseado (Santa Cruz). Estos son:

- **Distrito Sierra Cuadrada.** – Comprende los yacimientos "Sierra Cuadrada E y O", "Meseta de los Páez", etc. La mineralización (*carnotita*, *autunita*, *schroëckingerita*, etc.) se relaciona con un banco regional de areniscas conglomerádicas de edad Cretácica, portador de numerosos troncos fósiles, a cuyo alrededor se deposita el uranio. Recientemente se inició un programa de sondeos en el área de anomalías superficiales más densas.
- **Distrito de Paso de Indios.** – Incluye los yacimientos "Los Adobes", "Pichiñán", "C° de los Chivos", "C° Cóndor", "Carhué Niyeu", etc. que se corresponden con un ciclo fluvial de sedimentos psamíticos de edad Cretácica, el cual incluye varios niveles superpuestos, con abundante materia orgánica y minerales de uranio (*uraninita*, *schroëckingerita*, *fosfuranilita*). Los cuerpos mineralizados son abundantes, aunque de dimensiones individuales modestas (100 a 200 t de  $U_3O_8$  cada uno).
- **Distrito Río Chico.** – Encierra los yacimientos "Cañadón Gato", "Cañadón Krueger", etc., enclavados a lo largo de una diatrema en sedimentos del Terciario Inferior, con mineralización epigenética de uranio (*metaautunita* y *metatorbernita*) fijada por asfalto y arcillas montmorilloníticas.

El yacimiento más conocido es el de "Los Adobes", situado 40 km al N de la localidad de Paso de Los Indios, en el valle del Río Chubut.

El cuerpo principal fue explotado y proveyó 100 000 t de mineral con ley media del 1,5‰ de  $U_3O_8$ ; actualmente es beneficiado en una planta de lixiviación en pilas, en Ea. Berwyn (Paso de Indios). Se continúa la exploración

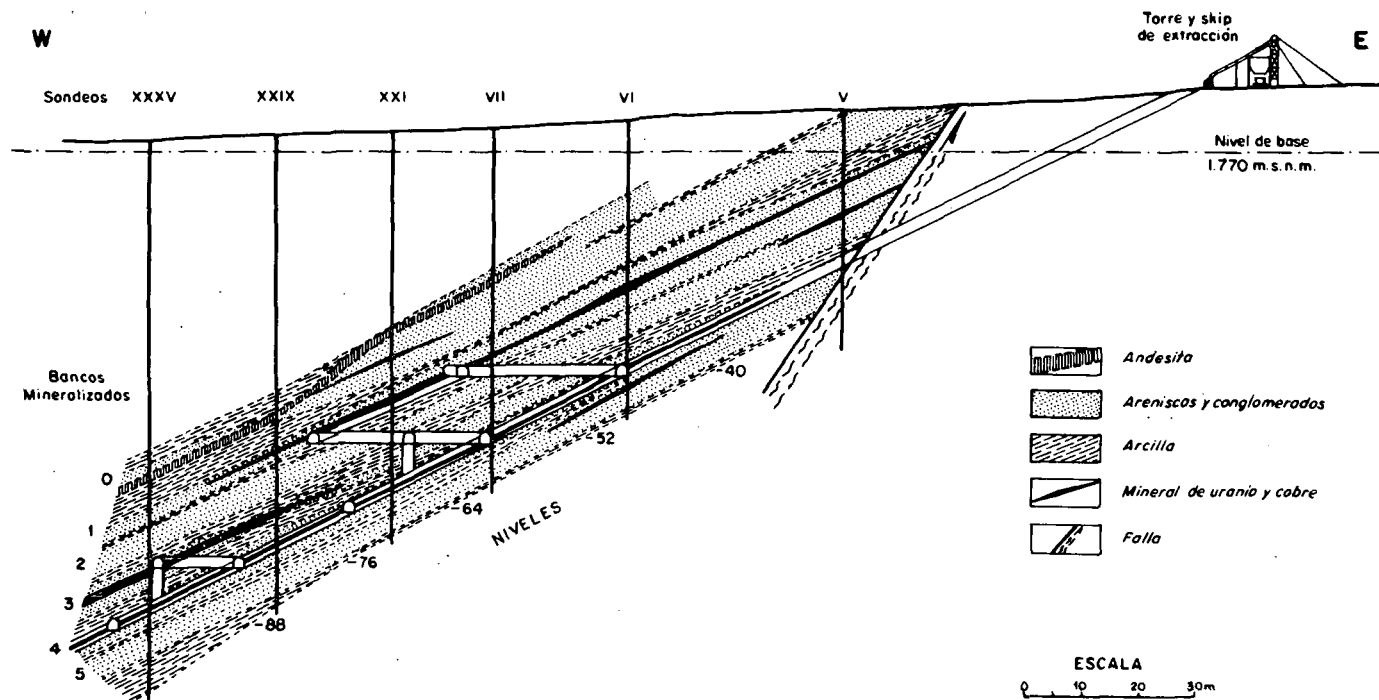


FIG.6. Perfil esquemático transversal del yacimiento Huemul, sector Agua Botada (Mendoza).

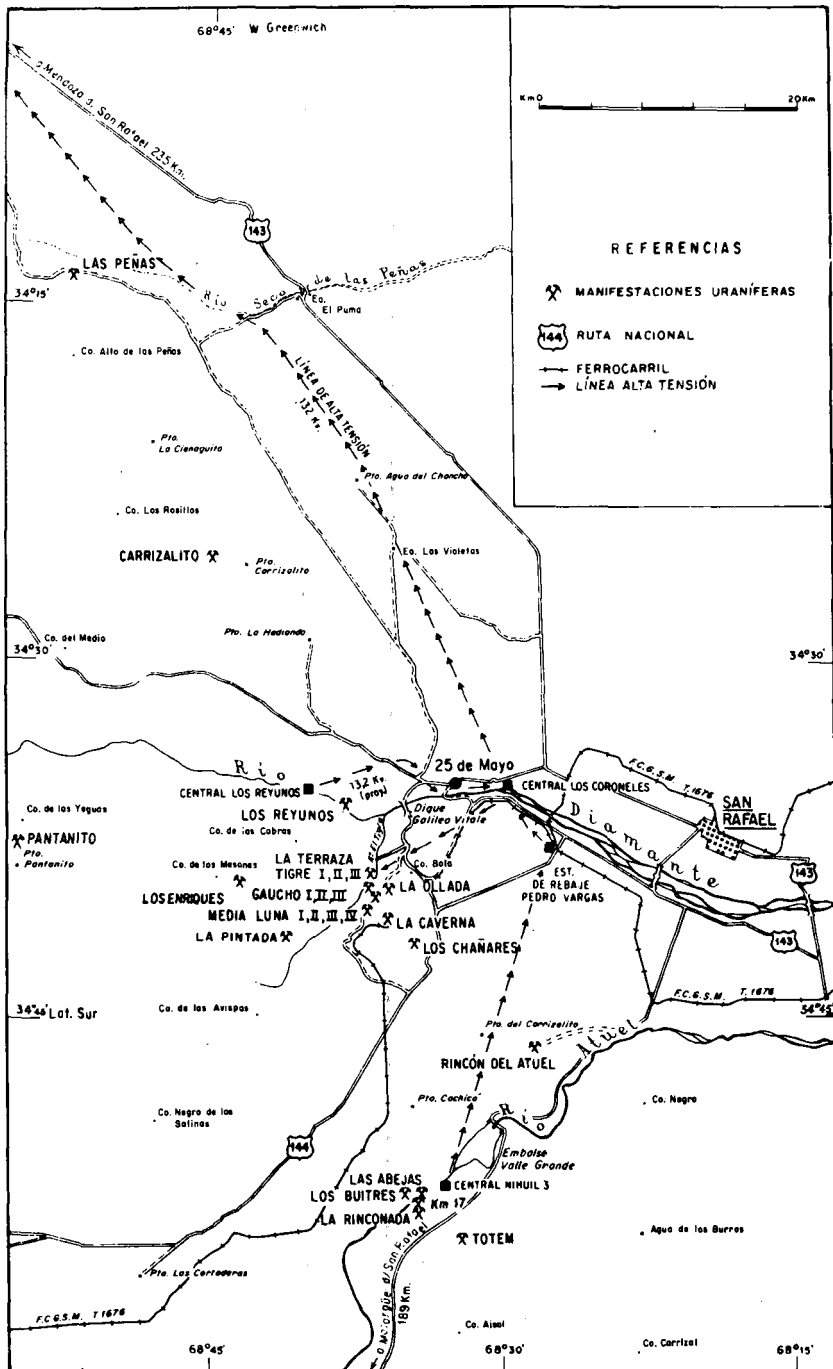


FIG. 7. Distrito Sierra Pintada (Mendoza).

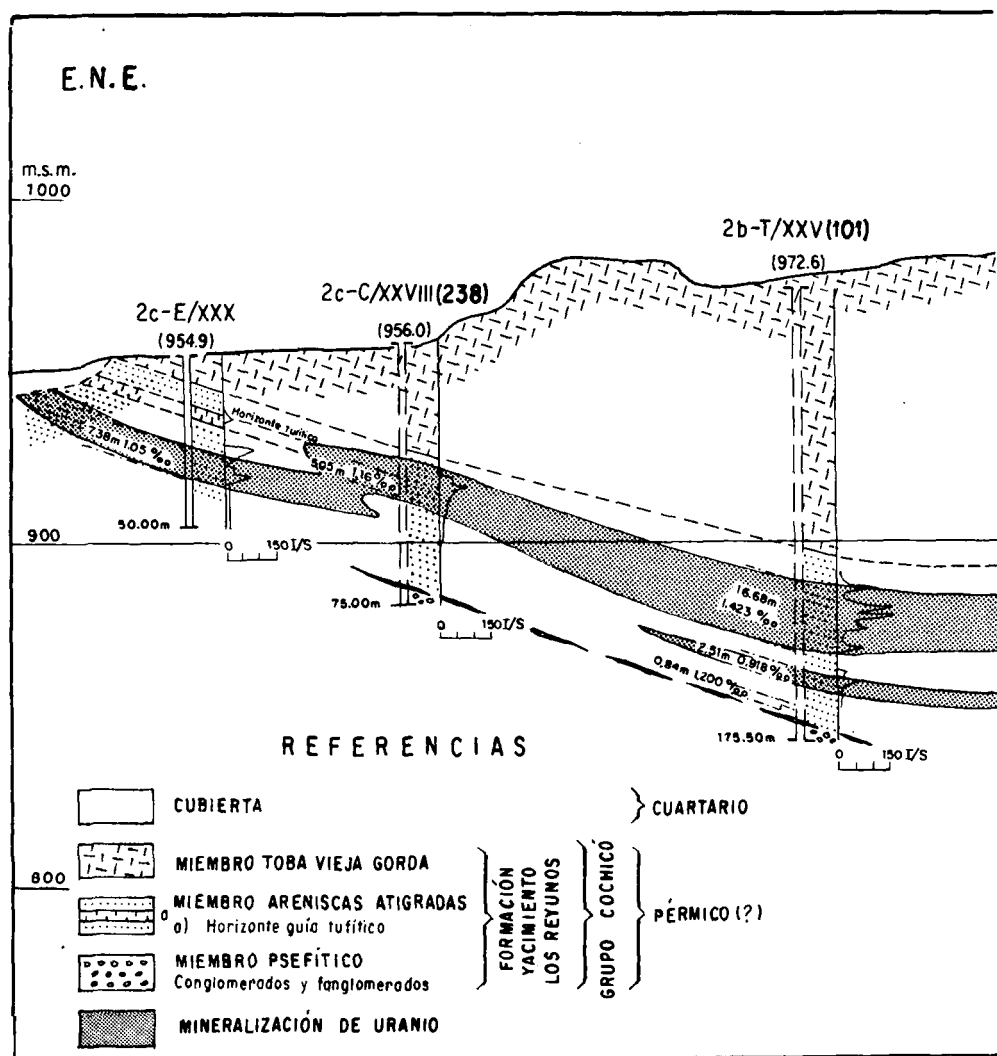
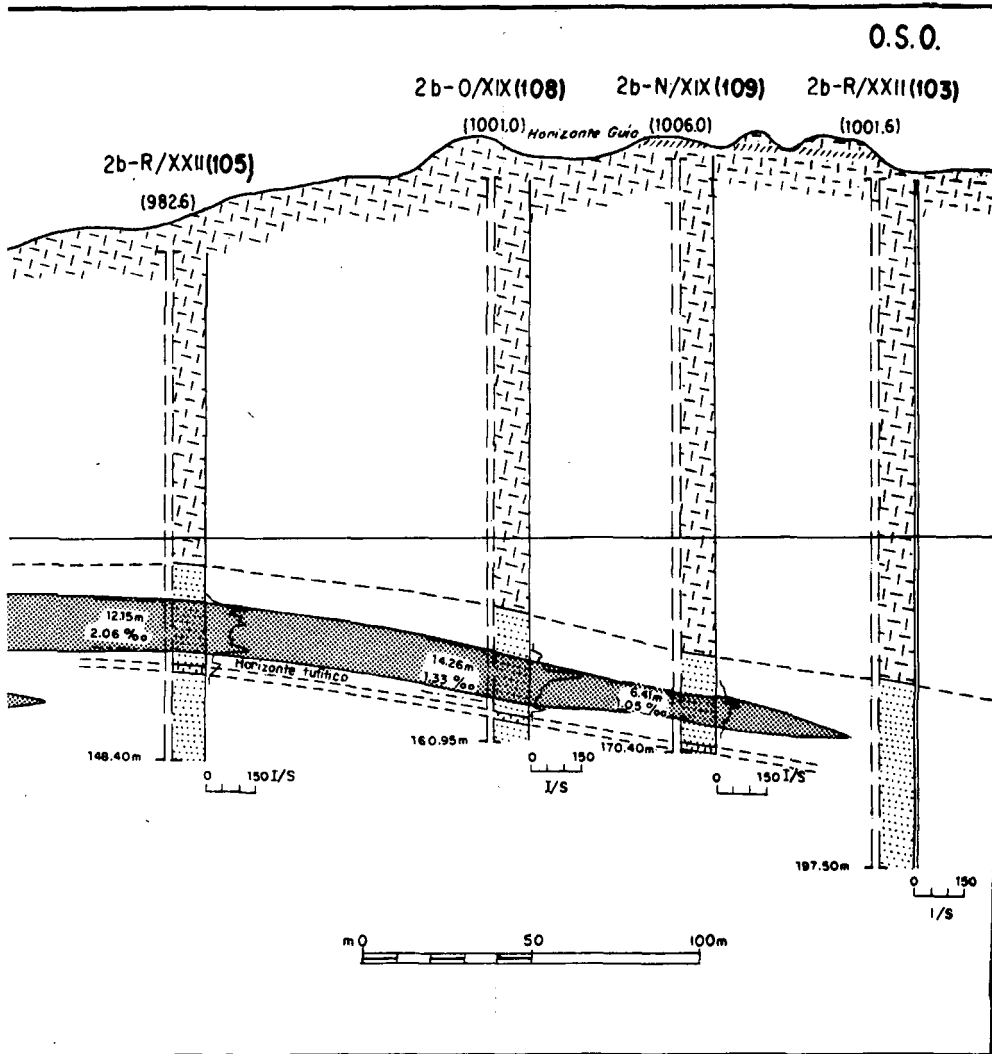


FIG.8. Perfil geológico Sierra Pintada, yacimiento La Terraza.

de dos cuerpos próximos mediante sondeos, los cuales muestran varios bancos subhorizontales mineralizados, hasta 100 m de profundidad.

Actualmente se licita la explotación de C° Cóndor, que proveerá 50 000 t de mineral y se está preparando el yacimiento Cerro Cóndor Bis, con reservas algo menores.

La profusión de yacimientos fundamentó un programa de desarrollo (Proyecto Patagonia) que incluye la prospección aérea, actualmente en ejecución, de un área de 100 000 km<sup>2</sup> (Fig.2) y la ejecución de 15 000 m anuales de perforaciones.



#### 4.9. Distrito Sierra Pintada (San Rafael, Mendoza)

La aplicación de la prospección aérea, sobre la base de una evaluación actualizada de la geología del área y la interpretación de varias pequeñas manifestaciones uraníferas de reducido valor, permitieron el descubrimiento de importantes yacimientos de uranio en Sierra Pintada, provincia de Mendoza (Fig.7), que se extienden desde la Sierra de Las Peñas, Arroyo del Tigre, Cuesta de los Terneros, Los mesones, hasta El Nihuil.

La constelación más densa de cuerpos mineralizados ("Tigre I, II y III", "Media Luna I, II, III", "Los Gauchos I y II"; "Los Chañares", "La Caverna" y "La Ollada") se agruparon como minas nucleares "Dr. Bauliés" y "Los Reyunos".

Los yacimientos, peneconcordantes, se corresponden con un espeso miembro de areniscas arcósicas, a las que suceden tobas cristalinas, ambas de edad pérmica, las cuales aparecen en un ambiente dominado por varios ciclos efusivos e intrusivos permotriásicos.

La mineralización se ubica de 10 a 20 m por debajo de las tobas, en relación con concentraciones rojo-violáceas de óxidos de hierro y está constituida por *uraninita* que se asocia con *brannerita* y *coffinita*. En superficie aparece *uranofano*.

La mineralización se distribuye en varios niveles que pueden integrar espesores útiles de 3 hasta más de 20 m. Las leyes fluctúan desde el 0,8 al 2,5‰ de  $U_3O_8$ ; en cambio, si se consideran los espesores totales citados, la ley media del cuerpo principal (1500 × 600 × 8,50 m) resulta del orden del 1,30‰ de  $U_3O_8$  (con una ley de corte del 0,40‰ de  $U_3O_8$ ).

La exploración física efectuada hasta ahora (unos 80 000 m de perforaciones) muestra una continuidad regular de la mineralización hasta más de 200 m de profundidad en "Tigre I - La Terraza" y hasta más de 100 m en "Tigre III", "Media Luna II" y "Los Chañares" (Fig.8).

La estimación de las reservas certificadas hasta la fecha y factibles de aprovechamiento económico inmediato a costos de obtención del concentrado de hasta dóls. 30/lb de  $U_3O_8$ , es de 16 000 t de  $U_3O_8$  para el cuerpo principal "Tigre I-La Terraza" y otras 3000 t de  $U_3O_8$  en varios cuerpos satélites próximos, uno de los cuales ("Tigre III") se pondrá en explotación de inmediato para abastecer a la Fábrica Malargue y a una instalación local de lixiviación en pilas.

El potencial de este distrito es de primer orden, y la CNEA continúa su prospección y exploración regular. Recientemente se localizó un nuevo yacimiento ("Carrizalito") a 30 km al norte de los anteriores, que está siendo explorado mediante sondeos.

Los programas inmediatos de desarrollo prevén la construcción de un complejo minero-fabril de una capacidad de producción de 700 t de  $U_3O_8$ /a, bajo la forma de "Contrato de Servicios de Explotación", con la inversión de capital a cargo del contratista y la garantía de la CNEA de adquirir cantidades mínimas anuales de concentrados.

## 5. RECURSOS Y POTENCIAL URANIFERO

El desarrollo de recursos uraníferos en Argentina se mantiene aún como una función lineal del esfuerzo de exploración. Considerando solamente los recursos razonablemente asegurados, a costos de hasta dóls. 30/lb de  $U_3O_8$ , la

**CUADRO I. RECURSOS URANIFEROS ARGENTINOS**  
(Según costos de elaboración de la torta amarilla)

Categorías	Dóls./kg de U			Totales
	< 80	80-130	> 130	
Recursos razonablemente asegurados	27 000	6 000	3000	36 000
Recursos adicionales estimados	4 500	6 000	4500	15 000
Totales	31 500	12 000	7500	51 000

relación se mantiene en 8 metros de sondeos por t de  $U_3O_8$ . Si se incluyen los recursos adicionales estimados hasta costos de producción de dóls. 50/lb de  $U_3O_8$ , la relación disminuye a 5 m/t de  $U_3O_8$ .

Los recursos uraníferos desarrollados hasta el presente se indican en el Cuadro I.

El potencial uranífero – excluyendo los recursos razonablemente asegurados, establecido sobre bases de favorabilidad geológica y frecuencia de yacimientos y anomalías explorados y/o conocidos, es del orden de las 400 000 t de  $U_3O_8$ .

## BIBLIOGRAFIA

- ANZULOVICH, J., Informe geológico sintético sobre el distrito uranífero Los Gigantes, con especial atención al yacimiento "Schlaginweit", Dptos. Cruz del Eje, Punilla y San Alberto, Provincia de Córdoba, Inf. Inéd. CNEA, Buenos Aires, 1978.
- BELLUCO, A.E., DIEZ, J.D., ANTONIETTI, C.E., "Los depósitos uraníferos de las provincias de La Rioja y San Juan" (Actas V Cong. Geol. Arg. Buenos Aires, 1972) Vol.II, Asoc. Geol. Arg., Buenos Aires (1974).
- BELLUCO, A.E., DIEZ, J.D., ANTONIETTI, C.E., ACHEN, H., VALDERI, C.J., "Los depósitos uraníferos de las provincias de Mendoza y Neuquén" (Actas V Cong. Arg. Buenos Aires, 1972) Vol.II, Asoc. Geol. Arg., Buenos Aires (1974).
- COCO, A.L., Relevamiento aeroradimétrico sobre áreas anómalas Los Reyunos – El Tigre – Los Chañares, Inf. Inéd. Ger. Mat. Prim., CNEA, Buenos Aires, 1968.
- FRIZ, C.T., RODRIGO, F., STIPANICIC, P.N., "Recursos y posibilidades uraníferas en Argentina", Peaceful Uses of Atomic Energy (Actas 3ª Conf. Int. Ginebra, 1964) Vol.12, NU, Nueva York (1965) 42.
- GORUSTOVICH, S.A., SOLIS, J.A., "Area La Alumbreira, nueva zona de interés uranífero del sudeste de la provincia de Catamarca" (Actas II Cong. Iberoam. Geol. Econ. Buenos Aires, 1975) Vol.II, Buenos Aires (1975).

LUCERO, H.N., DIEZ, J.D., NOVA, J.M., "Los depósitos de las Sierras Pampeanas (provincias de Córdoba y San Luis)", (Actas V Cong. Geol. Arg. Buenos Aires, 1972) Vol.II, Asoc. Geol. Arg., Buenos Aires (1974).

MAZZIERI, G., PEREZ, E., PRIETO, A.O., Informe sobre los resultados de la exploración geológica-minera en el branquianticlinal del Tigre y sus manifestaciones nucleares más importantes, Inf. Inéd. Ger. Mat. Primas, CNEA, Mendoza, 1971.

NICOLI, H.B., "Consideraciones sobre la génesis de depósitos uraníferos en areniscas: distrito de Sierra Pintada, Dpto. San Rafael, Prov. de Mendoza" (Actas V Cong. Geol. Arg. Buenos Aires, 1972) Vol.II, Asoc. Geol. Arg., Buenos Aires (1974).

NICOLI, H.B., LUCERO, H.N., GAMBA, M.A., "Observaciones geológico-tectónicas y consideraciones sobre la geoquímica del uranio en las plutonitas de las sierras de Los Gigantes, Prov. de Córdoba (Actas V Cong. Geol. Arg., Buenos Aires, 1972) Vol.II, Asoc. Geol. Arg., Buenos Aires (1974).

NOYA, J.M., Propuesta de sondeos para exploración de C° Urcuschum, Inf. Inéd. Ger. Mat. Primas, CNEA, Buenos Aires, 1965.

OLSEN, H., "Yacimiento "Los Adobes", Departamento Paso de Indios, Provincia de Chubut", (Act.II Jorn. Geol. Arg. Salta, 1963) Vol.I, Salta (1963).

OLSEN, H., RODRIGUEZ, E., BELLUCO, A.E., GIORDANO, N., GORUSTOVICH, S., LUCERO, H.N., LARDONE, L., Estimación del Potencial Uranífero de la República Argentina, Inf. Inéd. CNEA, Buenos Aires, 1976.

ORTEGA FURLOTTI, A., RODRIGUEZ, E.J., PRIETO, A.O., VALDIVIESO, A., "El nuevo distrito uranífero de Sierra Pintada, Prov. de Mendoza" (Actas V Cong. Geol. Arg. Buenos Aires, 1972) Vol.II, Asoc. Geol. Arg., Buenos Aires (1974).

RODRIGO, F., Descubrimiento de importantes yacimientos de uranio en la Sierra Pintada, San Rafael, Provincia de Mendoza, Rev. Mundo Geológico, N° 4, Buenos Aires (1971).

RODRIGUEZ, E.J., VALDIVIESO, A., Exploración geológica semiregional Sierra Pintada, Inf. Inéd. Ger. Mat. Primas, CNEA, Mendoza, 1970.

SACCONE, E., ANZULOVICH, J., BELCASTRO, H., Anomalías descubiertas por prospección aérea y terrestre, en el período 1957-1963, Chubut y Santa Cruz, Inf. Inéd. Ger. Mat. Primas, CNEA, Buenos Aires, 1963.

STIPANICIC, P.N., BAULIES, O.L., RODRIGO, F., MARTINEZ, C.G., "Depósitos uraníferos argentinos con control sedimentario" (Actas IV Simp. Interam. Aplic. Pacíf. Energ. Nucl. México, 1963), OEA, Washington (1964).

STIPANICIC, P.N., RODRIGO, F., FRIZ, C.T., LINARES, E., "Provincias uraníferas argentinas", XXIII Congr. Geol. Intern., Praga, 1968.

# PROYECTO DE INVESTIGACION DE LAS POSIBILIDADES DE URANIO EN COSTA RICA

R. CASTILLO

Comisión de Energía Atómica de Costa Rica,  
Universidad de Costa Rica,  
San José, Costa Rica

## Abstract-Resumen

### RESEARCH PROJECT ON URANIUM PROSPECTS IN COSTA RICA.

Several Costa Rican state institutions are interested in implementing a research project on the prospects for uranium and other radioactive elements in the national territory. Assistance for this project has already been requested from the United Nations Development Programme (UNDP) Special Fund in view of the presence in Costa Rica of acidic igneous rocks (intrusive and extrusive) and associated sedimentary and volcanic rocks of differing lithological character ranging in age from the Jurassic (?) – Cretaceous to the Upper Tertiary – Quaternary, which are similar in part to the igneous and sedimentary rocks from the Precambrian to the Lower Phanerozoic in North America, containing abundant known deposits of uranium of low recovery cost. It is hoped to achieve the following objectives: (1) to select some areas that are geologically favourable for the existence of uranium horizons; (2) to select the analytical and exploration techniques; (3) to determine the radiation and content of uranium and any other radioactive elements in the rocks occurring in the selected areas, and (4) to prepare a report on the results and to define future studies.

### PROYECTO DE INVESTIGACION DE LAS POSIBILIDADES DE URANIO EN COSTA RICA.

Varias instituciones del Estado costarricense tienen interés en desarrollar un proyecto de investigación relativo a las posibilidades de uranio y otros elementos radiactivos en el territorio nacional. Para este proyecto ya se ha solicitado la colaboración del Fondo Especial del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en vista de que existen rocas ígneas ácidas (intrusivas y extrusivas) y asociadas sedimentarias y volcánicas de diversa naturaleza litológica, que oscilan en edad del Jurásico (?) – Cretácico al Terciario Superior – Cuaternario, similares en parte a rocas también ígneas y sedimentarias del Precámbrico – al Fanerozoico Inferior de Norteamérica que contienen abundantes yacimientos de uranio conocidos de bajo costo de explotación. Se espera cumplir con los siguientes objetivos: 1) selección de algunas áreas que geológicamente favorezcan la existencia de niveles importantes de uranio; 2) selección de las técnicas analíticas y de exploración; 3) determinación de la radiación y contenido de uranio y cualquier otro elemento radiactivo en las rocas constitutivas de las áreas seleccionadas, y 4) preparación de un informe sobre los resultados y definición de futuras investigaciones.

## INTRODUCCION

La investigación de las posibilidades de uranio en Costa Rica se ha asociado al levantamiento del mapa geoquímico regional del país. Instituciones nacionales

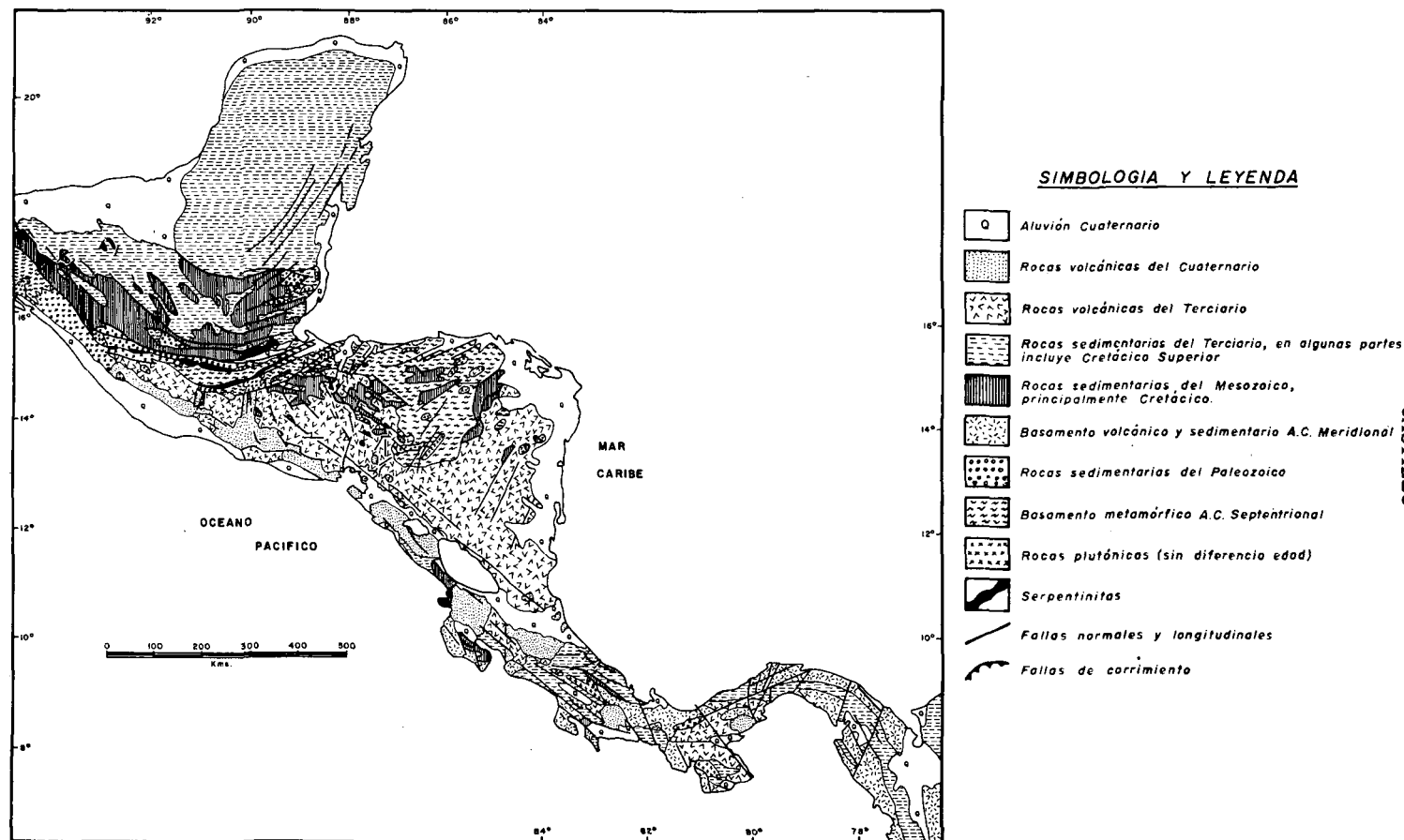


FIG.1. Mapa geol3gico simplificado de Am3rica central.

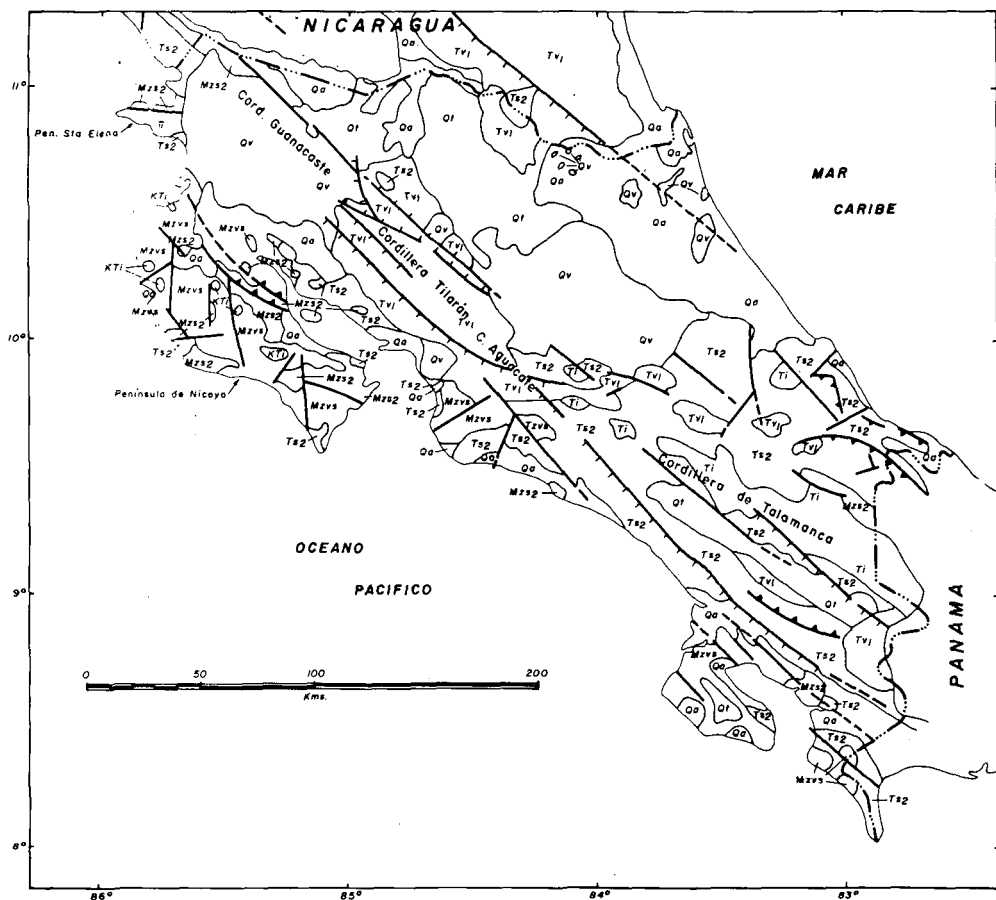
interesadas en los temas antes mencionados, como la Comisión de Energía Atómica, la Universidad de Costa Rica y la Corporación Costarricense de Desarrollo (CODESA), han coincidido en la importancia de integrar ambas metas en un solo proyecto de investigación. Se espera en el futuro lograr la colaboración del Fondo Especial de las Naciones Unidas (PNUD).

## ANTECEDENTES

En América Central, los tipos de ambiente favorables al uranio, desde el Precámbrico y el Fanerozoico, se supone y se conoce afloran en superficie. El basamento Precámbrico todavía no ha sido completamente delineado en superficie, aunque sí la secuencia de rocas del Fanerozoico. Al respecto, las rocas que pudieran asociarse al basamento Precámbrico y las ya asignadas a los niveles inferiores del Fanerozoico (inferiores al menos al Cretácico Inferior) caracterizan la porción norte de América Central, conocida como América Central Nuclear, que se extiende hasta el norte de Nicaragua (Fig.1). Este tipo de ambiente geológico es el que más se relaciona con aquellos ambientes en donde existen las principales reservas de uranio del mundo. El ambiente geológico de la porción sur de América Central, que se extiende hasta el norte de Colombia, está caracterizado principalmente por una secuencia de rocas ígneas y sedimentarias, de afiliación oceánica y continental (Fig.2), originadas solamente durante el Fanerozoico, desde el Mesozoico Medio-Superior al Terciario Superior-Cuaternario, ambiente que podría en parte relacionarse en edad con la provincia geoquímica de uranio de Colorado, Wyoming. Costa Rica, que forma parte de esta porción, se convierte en una región de la tierra en donde sería conveniente investigar el contenido de uranio y torio con el fin de determinar el nivel real de éstos en las rocas.

Desde la costa del Pacífico hasta las regiones más empinadas en la parte central, afloran asociaciones de rocas, atractivas desde el punto de vista del uranio, que se extienden en edad desde el Jurásico (?) – Cretácico hasta el Terciario Superior – Cuaternario.

Algunas asociaciones sobre las cuales se recomienda realizar investigaciones del contenido de uranio, son aquellas originadas durante el Terciario, sean éstas de naturaleza ígnea o sedimentaria. Al respecto, rocas ígneas ácidas y asociadas petrológicas como granitos, granodioritas, dioritas, pegmatitas (aplitas), filones hidrotermales y eventuales pórfidos cupríferos que afloran o pudieran existir en la parte central de Costa Rica, en las cordilleras de Talamanca, Aguacate y Tilarán, bien merecen ser estudiadas preliminarmente en cuanto a su contenido de uranio y cualquier otro mineral radiactivo. También las tobas riolíticas, dacíticas y cuarzolíticas del Cuaternario de la Cordillera de Guanacaste merecen ser investigadas.



### LEYENDA Y SIMBOLOGIA

#### ROCAS SEDIMENTARIAS Y VOLCANICAS DEL CUATERNARIO

- Qa** Sedimentos aluviales y sedimentos marinos recientes en las costas.
- Ql** Terrazas (posiblemente del Pleistoceno). Incluye materiales lahárlicos al norte del país.
- Qv** Rocas volcánicas, conos volcánicos, rellenos de pómez, mesetas de ignimbritas y depósitos lahárlicos.

#### ROCAS PLUTONICAS DEL TERCIARIO Y CRETACICO

- Ti** Rocas intrusivas del Cretácico; principalmente diorita, granodiorita y granito.
- KTi** Rocas intrusivas del Cretácico; principalmente diorita y diabasa en la Península de Nicoya.
- π** Serpentinita posiblemente del Cretácico.

#### ROCAS SEDIMENTARIAS Y VOLCANICAS DEL TERCIARIO Y MESOZOICO

- Tv1** Rocas volcánicas del Terciario (Mioceno Superior a Plioceno; actividad volcánica post-orogénica): coladas de lava, lobes, mesetas de ignimbrita; sedimentos volcánicos terrestres y lacustres.
- Ts2** Rocas sedimentarias del Terciario (Paleoceno a Plioceno; fases orogénica y post-orogénica): principalmente sedimentos marinos y algunos terrestres (Plioceno) con intercalaciones de rocas volcánicas.
- Mzs2** Rocas sedimentarias del Mesozoico (Cretácico Superior, fase eugeosinclinal): sedimentos marinos con intercalaciones de rocas volcánicas.
- Mzs** Rocas volcánicas sedimentarias del Mesozoico (Campañiano y más antiguo; fase eugeosinclinal inicial): principalmente basaltos con sedimentos intercalados con metamorfismo incipiente.
- Fallas, sin indicar tipo
- Fallas normales, picos indican lado deprimido
- Fallas inversas y de corrimiento, picos indican lado levantado.

FIG.2. Mapa geológico de Costa Rica.

A la luz del conocimiento actual, también habría que determinar qué posibilidades brinda en Costa Rica el complejo ofiolítico que alternadamente aflora a lo largo de la costa del Pacífico, intruído ocasionalmente por cuerpos de diorita, del Jurásico ( ? ) – Cretácico y la secuencia de rocas sedimentarias del Cretácico y el Terciario Inferior, inmediatamente sobreyacente, correlacionable en edad con la provincia geoquímica de uranio de Colorado – Wyoming.

Rocas sedimentarias, eventualmente orgánicas (Terciario Inferior a Medio) y lateritas bauxíticas (Pleistoceno), principalmente aquellas originadas sobre fanglonerados derivados de la Cordillera de Talamanca, frecuentes estas últimas en Costa Rica, también merecen ser preliminarmente investigadas, así como algunos lignitos que aparecen en menor proporción.

Es importante mencionar que, recientemente, una investigación preliminar sobre las posibilidades de uranio en el Intrusivo de Monterrey, un granito al sur de San Ignacio de Acosta, reveló manifestaciones de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en el área.



# **OBSERVACIONES SOBRE LA RELACION ENTRE FACIES LACUSTRINAS Y YACIMIENTOS DE URANIO EN SEDIMENTOS CONTINENTALES**

E.A. NOBLE  
US Geological Survey,  
Reston, VA,  
United States of America

## **Abstract-Resumen**

### **OBSERVATIONS ON THE RELATION BETWEEN LACUSTRINE FACIES AND URANIUM DEPOSITS IN CONTINENTAL SEDIMENTS.**

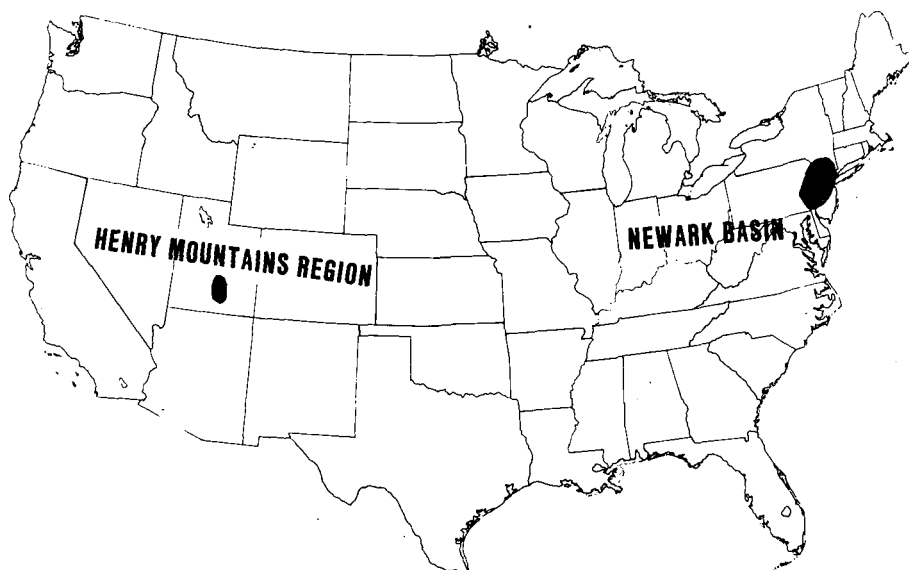
A recent sedimentological concept and approach in the evaluation of lacustrine deposition environments for their geological uranium potential are described. The presence of certain types of limonite seems to be a key factor in the process of leaching, the formation of pyrite and the precipitation of uranium.

### **OBSERVACIONES SOBRE LA RELACION ENTRE FACIES LACUSTRINAS Y YACIMIENTOS DE URANIO EN SEDIMENTOS CONTINENTALES.**

Se exponen una teoría y un enfoque sedimentológicos recientes para la evaluación del potencial geológico-uranífero de ambientes lacustres de sedimentación. La presencia de ciertos tipos de limonita parece ser un factor clave en el proceso de lixiviación, formación de pirita y precipitación del uranio.

## **1. INTRODUCCION**

Cualquier nueva técnica de exploración, o mejoramiento de ella, en cuanto a la formación de yacimientos de uranio de tipo de arenisca puede ser de gran valor en Sur y Norteamérica. Ese tipo de técnica, o modelo, de exploración con buenas perspectivas está siendo desarrollada por dos geólogos del US Geological Survey, Fred Peterson y Christine Turner-Peterson, marido y mujer que han estado trabajando en partes muy alejadas de los Estados Unidos. Se van a describir aquí, brevemente, las observaciones y razonamiento que han llevado a los Petersons a concluir que ciertos yacimientos de uranio reflejan un control de facies por limolitas lacustrinas.



*FIG.1. Distribución geográfica de las rocas triásicas de la cuenca de Newark y del miembro Salt Wach de la formación Morrison en Colorado.*

## 2. OBSERVACIONES EN ROCAS TRIASICAS DEL ESTE DE LOS ESTADOS UNIDOS

Al comienzo de la década de los cincuenta se encontró uranio en afloramientos de rocas continentales triásicas en cuencas de dislocación (rift) en New Jersey, Pennsylvania, y Connecticut (Cuenca Newark — Fig.1). En 1975 y 1976, Christine Turner-Peterson [1] reinterpretó el ambiente deposicional de estas rocas triásicas (Fig.2), usando conceptos modernos de sedimentología. Su reconstrucción demostró claramente que algunas areniscas se depositaban en efecto en lagos, cuando antes se creía que se depositaban en el medio ambiente. El uranio se encontró en areniscas lacustrinas cercanas a orillas de playas adyacentes a limolitas lacustrinas negras (Fig.2). Cuando las areniscas lacustrinas no estaban junto a limolitas lacustrinas negras, no se encontró uranio. Turner-Peterson postuló que algún agente precipitante se desprendía de las limolitas negras debido a la compactación, había entrado en la arenisca adyacente, donde había encontrado agua subterránea conteniendo uranio, y había producido la precipitación del uranio (Fig.3).

### 3. OBSERVACIONES EN ROCAS JURASICAS DE LA "COLORADO PLATEAU"

Durante 1975 y 1976, Fred Peterson aplicó técnicas modernas de sedimentología para la reconstrucción de los paleoambientes representados por la formación jurásica Morrison, especialmente con respecto al miembro Salt Wash Arenisca que contiene uranio y que ha sido muy productivo. Peterson [2] midió y describió el miembro Salt Wash en varias localidades dentro y cerca de la faja mineral de las "Henry Mountains" (Figs 1 y 4). El área de la faja ocupa una antigua depresión estructural, donde cursos de agua ramificados habrían entrado el ambiente lacustrino. Peterson encontró que la posición de la faja mineral coincidía con algunas limolitas lacustrinas. Descubrió que todas las indicaciones de uranio en superficie y subsuperficie estaban cerca de limolitas grises que interpretó como de origen lacustrino (Fig.4). Estas limolitas lacustrinas grises, consideradas favorables, contienen rastros de madera carbonizada y una variedad de esporas y polen. Otra característica de estas limolitas favorables que se observó, es que no contienen *botryococcus*, una alga que forma petróleo y que se ha encontrado en esquistos bituminosos y también en algunas limolitas de Salt Wash no asociadas con uranio.

### 4. INTERPRETACION

Se considera que la clave de la precipitación del uranio, tanto en las rocas triásicas del este de los Estados Unidos como en las rocas jurásicas de Henry Mountains de Utah, son las limolitas lacustrinas. Peterson [2] y Turner-Peterson [1] han postulado que las aguas intersticiales de las limolitas lacustrinas contendrían ácidos húmicos derivados de la degradación de restos de plantas. Las limolitas euxínicas, con un pH de cerca de 8, contendrían bisulfuro en el rol de especie estable de sulfuro. Los fluidos intersticiales expulsados por la compactación de estas limolitas hacia arenas adyacentes introducirían ácidos húmicos y bisulfuro a las arenas. Los ácidos húmicos lixiviarían el hierro de recubrimientos y fragmentos de arcilla. Después, el hierro se combinaría con el bisulfuro para formar pirita. Los ácidos húmicos fijarían uranio proporcionado por el agua subterránea (Fig.3).

### 5. COMENTARIO

En vista del gran volumen de rocas continentales parcialmente exploradas, hay buena oportunidad de aplicar estos conceptos a la exploración de uranio. El modelo de Peterson y Turner-Peterson será probado durante el próximo año en el Uravan Mineral Belt de "Colorado Plateau".

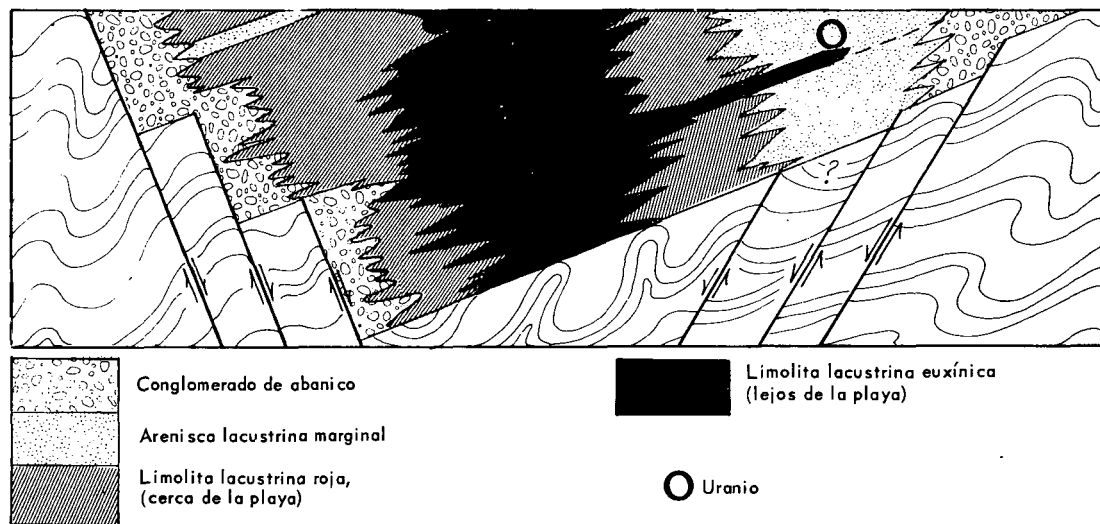


FIG.2. Cuenca Newark, Triásico-Jurásico, Estados Unidos orientales. Sección esquemática por C. Turner-Peterson.

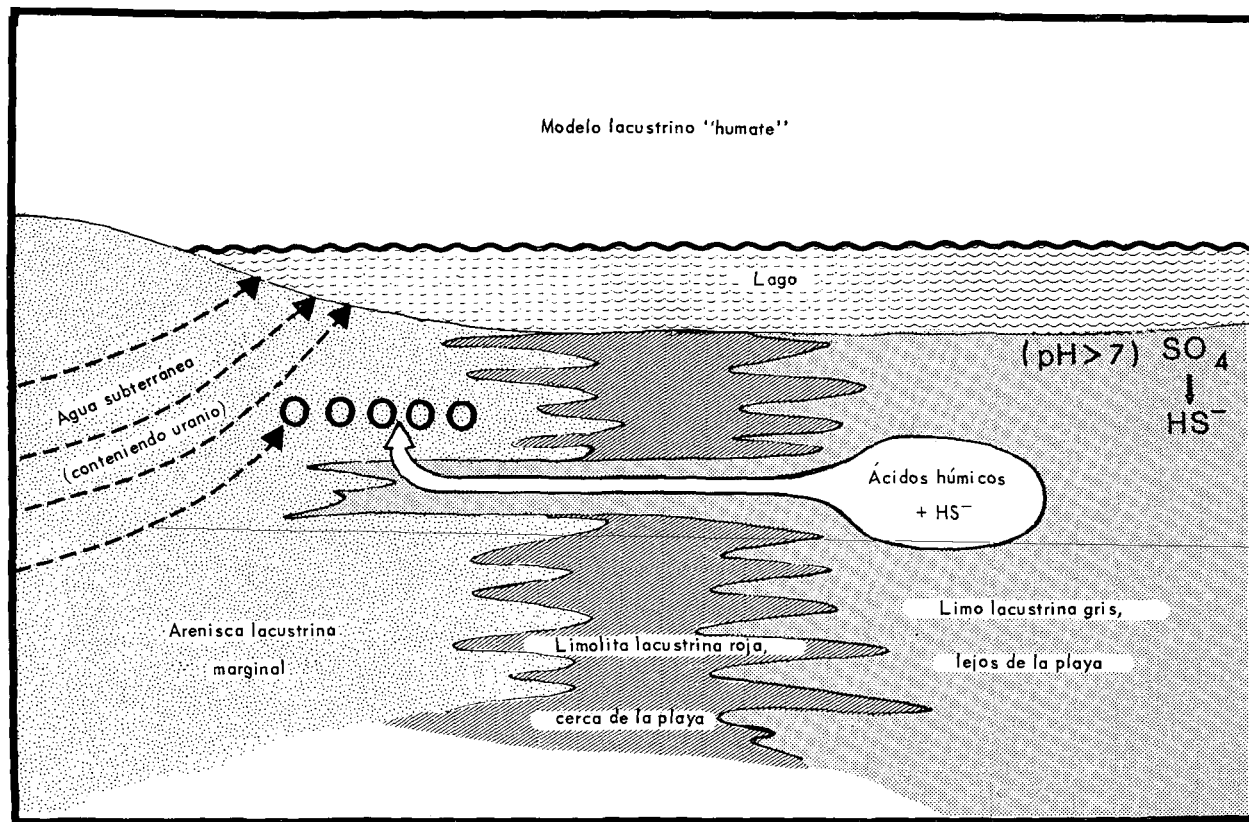


FIG.3. Ácidos húmicos de limonitas que fijan el uranio de agua subterránea para formar yacimiento uranífero de "tipo arenisco". Sección esquemática por C. Turner-Peterson.

## Faja mineral de Henry Mountains

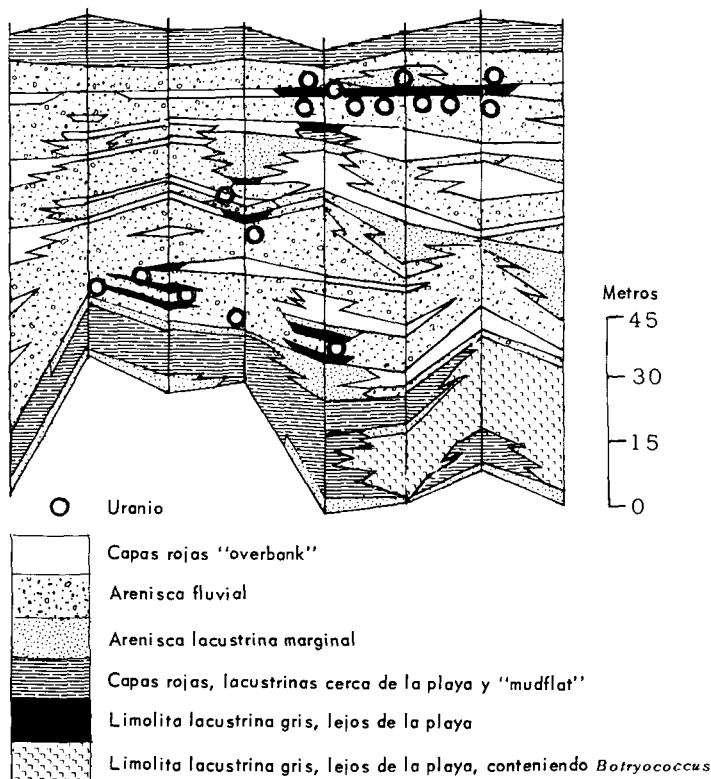


FIG.4. Ambientes sedimentacionales en la parte baja de la formación Morrison, región de Henry Mountains, Utah, Estados Unidos. Sección esquemática por F. Peterson.

## REFERENCIAS

- [1] TURNER-PETERSON, C.E., Uranium mineralization during early burial, Newark basin, Pennsylvania-New Jersey, in Campbell, J.A., Short papers of the US Geological Survey Uranium-Thorium Symposium, 1977, US Geol. Survey Circular 753 (1977) 3-4.
- [2] PETERSON, F., Uranium deposits related to depositional environments in the Morrison Formation (Upper Jurassic), Henry Mountains mineral belt of southern Utah; in Campbell, J.A., Short papers of the US Geological Survey Uranium-Thorium Symposium, 1977, US Geol. Survey Circular 753 (1977) 45-47.

## DISCUSSION

A. SIEGERS: Reference is made to the uranium in lacustrine sediments in Nevada/Arizona (USA). Here, uranium is found in rocks rich in organic matter, and in limestones. Sandstone intercalations are free of uranium. At least one deposit found up to now has reserves between 5000–10000 t  $U_3O_8$ , depending on the economic parameters used. Similar occurrences are presently being explored throughout the Basin and Range Province of the USA. Miocene sediments and volcanic rocks seem to be an excellent exploration target in North and South America.

E.A. NOBLE: Your remarks are certainly pertinent, and I echo your statement that these rocks should be targets in both North and South America. I should also like to acknowledge, Mr. Siegers, the co-operation that you have given Geological Survey personnel studying one of the lacustrine-type deposits that you have been developing.



# PROSPECCION URANIFERA Y FAVORABILIDAD GEOLOGICA EN EL URUGUAY

H.J. GOSO

Comisión Nacional de Energía Atómica,  
Montevideo,  
Uruguay

## Abstract-Resumen

### URANIUM PROSPECTING AND GEOLOGICAL FAVOURABILITY IN URUGUAY.

Uranium prospecting carried out in Uruguay since 1976 is described. On the basis of literature available and of an analysis of the large structural units pertinent to Uruguay's geology, the prospecting performed in general in the northeast of the country, and in particular in the districts of Cerro Largo and Las Cañas, is described. Some information is presented on uranium favourability in Uruguay related to sedimentary formations: Devonian (Cerrezeulo Formation) and Gondwana (San Gregorio and Tres Islas Formations), and to the Crystalline formations of the centre and southwest (1700–2000 m.y.) and of the east and southeast (500–700 m.y.).

### PROSPECCION URANIFERA Y FAVORABILIDAD GEOLOGICA EN EL URUGUAY.

Se describen los trabajos de prospección de uranio llevados a cabo en el Uruguay a partir de 1976. Tras los antecedentes y un análisis de las grandes unidades estructurales que componen la geología del Uruguay, se reseñan las tareas de prospección general efectuadas en el noroeste del país y, de detalle, en los distritos de Cerro Largo Sur y Las Cañas. Finalmente se hace una serie de consideraciones sobre las perspectivas uraníferas, en relación con las tres formaciones sedimentarias: Devónico (formación Cerrezeulo) y Gondwana (formación San Gregorio y Tres Islas), y sobre los terrenos cristalinos del centro suroeste (1700–2000 m.a.), así como del este y sudeste (500–700 m.a.).

## 1. INTRODUCCION

La presente contribución tiene por objeto dar a conocer los trabajos de prospección de uranio que se vienen desarrollando en el Uruguay desde 1976.

En ese momento, el Ministerio de Industria y Energía encargó la realización de esas tareas al Instituto Geológico "Ing. Eduardo Terra Arocena", lo que dió continuidad a las mismas.

Al mismo tiempo se recibió colaboración de la CNEA (Argentina) y se posibilitó el pleno usufructo de la asistencia que se venía recibiendo del OIEA.

## 2. ANTECEDENTES

Se resumen aquí las actividades llevadas a cabo entre los años 1965 y 1976 [1] (Fig. 1). En el año 1965, el Uruguay recibió asistencia técnica del OIEA, dirigida por su experto J. Cameron. La tarea estuvo encuadrada dentro de un reconocimiento radiométrico, mediante prospección autoportada. En el informe final correspondiente, Cameron [2] señala que la presencia de 112 anomalías encontradas sobre 7720 km recorridos, así como la manifestación uranífera de Paso de las Piedras, indican que en el Uruguay nos encontramos ante un caso que debe ser estudiado detalladamente y que merece la elaboración de un programa minucioso y completo de prospección.

Hacia fines del año 1965 y principios de 1966, asiste al país una misión de la Comisaría de Energía Atómica (CEA) de Francia, dirigida por el Dr. A. Grimbert. Los trabajos se vieron enmarcados dentro de una prospección general geoquímica radiométrica que cubrió algunas áreas del país, cuya distribución permitió investigar el comportamiento de distintas formaciones geológicas. En el informe efectuado, Grimbert [3] señala que la investigación realizada merece ser continuada ya que, exceptuando la formación Arapey, las demás formaciones geológicas, que cubren unos 100 000 km<sup>2</sup>, parecen a priori dignas de atención.

Finalizadas las misiones de estos dos expertos, se continuaron los trabajos de prospección siguiendo la programación aconsejada durante el primer semestre de 1966. Hacia el segundo semestre del mismo año, los trabajos fueron suspendidos.

A partir de 1971 se reinicia la prospección de uranio, continuándola con distinta intensidad hasta 1976, mediante un trabajo sistemático de prospección autoportada a nivel de investigación preliminar radiométrica en la cuenca gondwánica del noreste. Goso et al. [4], al referirse a los primeros resultados obtenidos, señalan que las formaciones San Gregorio y Tres Islas muestran una excelente respuesta estadística así como un destaque respecto de las otras formaciones existentes. La revisión de las anomalías presentes en ellas mostró valores de hasta 10 veces el fondo radiactivo, con contenidos de uranio de hasta 500 ppm en potencia, con exposición de hasta 0,5 m. Y en las conclusiones señalan que esos resultados, sumados a la presencia de pirita y carbón, a las variaciones granulométricas presentes en la formación, al hecho de estar bordeada por rocas cristalinas peniplanizadas, etc. abren buenas perspectivas de poder localizar yacimientos de uranio en las formaciones San Gregorio y Tres Islas.

A fines del año 1975, el Uruguay recibe otra misión técnica del OIEA, dirigida esta vez por J. Taylor. La actividad desarrollada consistió en una revisión de algunas anomalías descubiertas durante los trabajos de la misión Cameron [2], las anomalías detectadas en la prospección autoportada [4] y en un

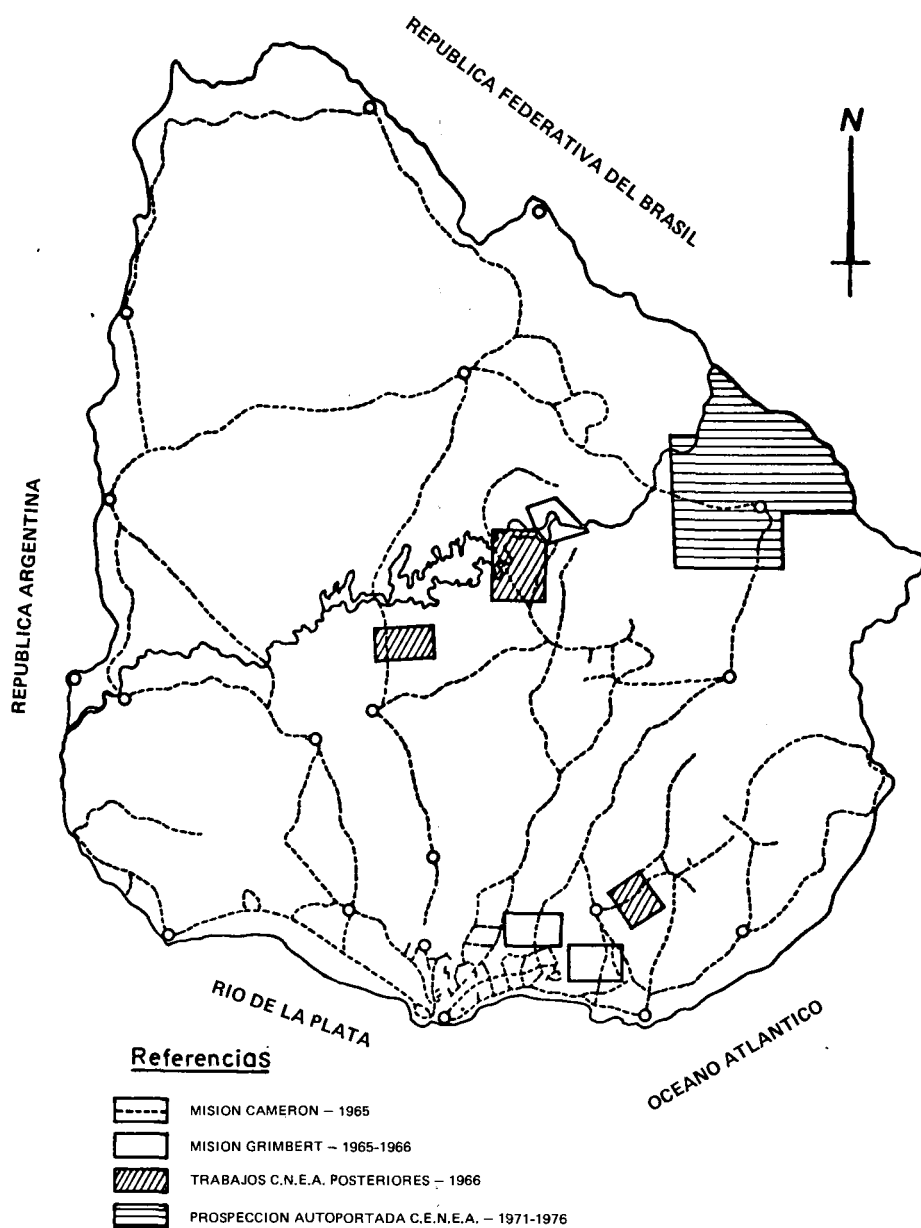


FIG.1. . Antecedentes de la prospección de uranio (1965-1976).

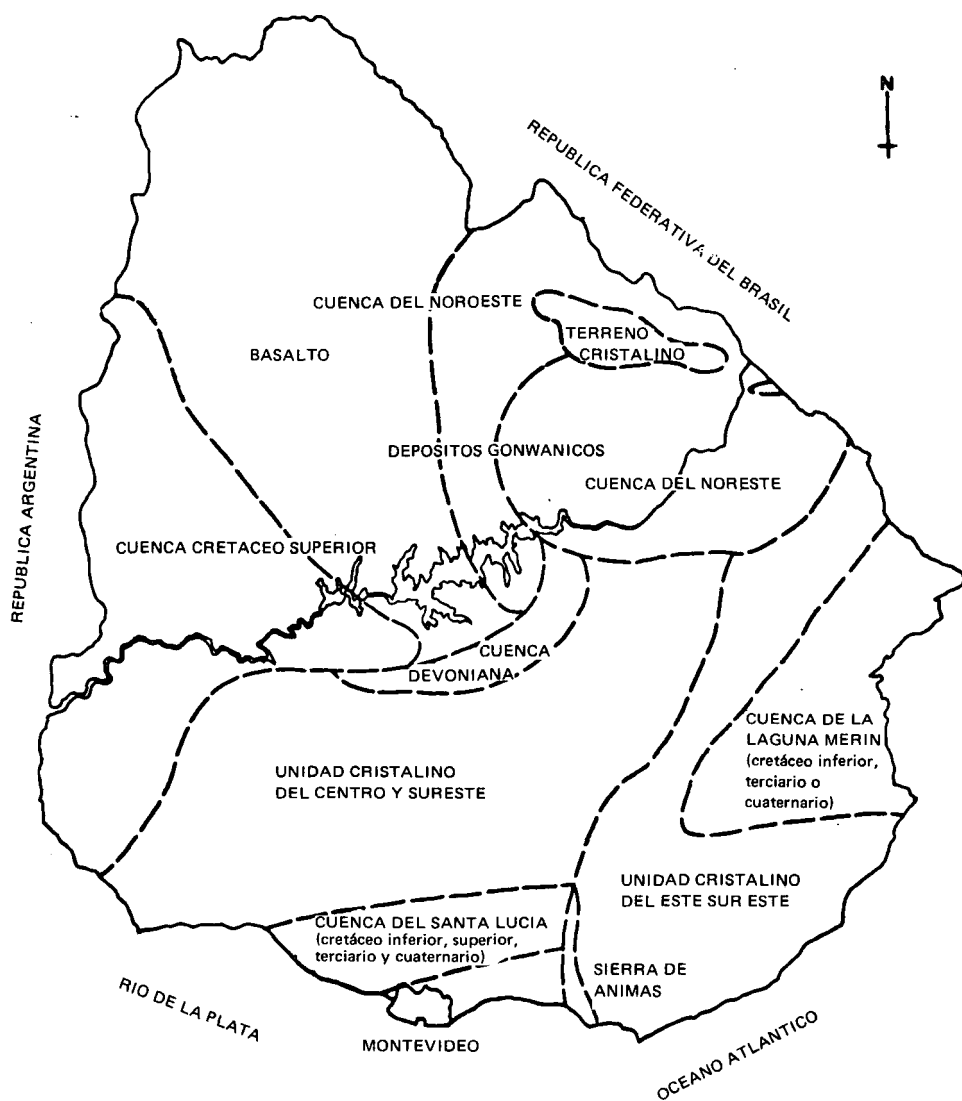


FIG.2. Distribución esquemática de las grandes unidades estructurales que componen la geología del Uruguay.

estudio rápido de otros depósitos sedimentarios del Cretácico Superior y del Terciario. En las recomendaciones del informe elaborado, Taylor [5] señala, en relación con el centro-noreste del país, que la prospección aérea — en ese momento en programación para un área de 1000 km sobre las formaciones San Gregorio y Tres Islas, en el noreste del territorio [4] — debería extenderse de modo que abarcara las formaciones San Gregorio y Tres Islas completas, la parte oriental del grupo Durazno (formación Cerrezuelo) y la zona del basamento cristalino adyacente, al sur de ellas en una anchura mínima de 10 km.

### 3. GRANDES UNIDADES ESTRUCTURALES

Componen el subsuelo uruguayo un zócalo cristalino, constituido por distintos eventos verificados hace más de 500 m.a., sobre el que se desarrollaron distintas cuencas sedimentarias a partir del Devónico (Fig. 2).

#### 3.1. Terrenos cristalinos

Constituyen la expresión más meridional, uruguaya riograndense sur del “Zócalo Brasileño” y son susceptibles de ser correlacionados con los de la provincia de Buenos Aires (Argentina) y del suroeste Africano.

En base a medidas de edad absoluta realizadas [6, 7], se pueden distinguir: una unidad desarrollada hacia el centro y suroeste con edades entre 1785 y 2030 m.a., a la que son asociables asomos cristalinos presentes en el norte del país, y otra unidad en el este y sureste con edades comprendidas entre 497 y 690 m.a.

La unidad del centro y suroeste corresponde a un ciclo orogénico con direcciones estructurales predominantemente E-NE, que hacia su borde este se vuelven NE y N-NE. Se encuentra constituida por metamorfitos (Montevideo, San José, Arroyo Grande), epi-meso y catazonales, migmatitas y granitos sin-tardi y post-orogénicos. Muestra elementos correspondientes a una importante tectónica en fase rígida (brechas, milonitas, filonitas), asociados o no a una acción filoniana (pegmatitas, cuarzo, microgabros, lamprofidos, basalto, riolitas), y granitos atectónicos. Presenta mineralizaciones de hierro-titanio (segregación), hierro (metamórfico) y oro (filones).

La unidad del este y sureste pertenece a un ciclo orogénico de dirección estructural dominante NE. Presenta epi y meso metamorfitos (Lavalleja, Sierra Ballena, Rocha), migmatitas y granitos sin-tardi y post-orogénicos. Son visibles también en ella acciones correspondientes a tectónica rígida (brechas, milonitas, filonitas) y actividad filoniana (pegmatitas, lamprofidos, cuarzo, basalto, riolita). Presenta así mismo distintos indicios de hierro (metamórfico, filoniano), oro, cobre, plomo y zinc (filones), barita y fluorita (filones).

Hacia la unión de ambos ciclos se sitúa la unidad, *Sierra de Animas*, como un gran filón hipabisal volcánico, con 500–550 m.a.

### 3.2. Terrenos sedimentarios

Sobre el “Zócalo Cristalino”, hacia los bordes, dentro de una plataforma estable, se desarrollan distintas cuencas pertenecientes al Devónico, Gondwana, Cretácico Inferior, Cretácico Superior y Cenozoico.

La *cuenca devónica* se desenvuelve hacia el centro del país, en una zona subsecuente de amplio radio, constituyendo estructuralmente un abierto sinclinal con eje debilmente buzante al NW. Comprende una sedimentación basal, litoral, areniscosa gruesa media y fina con intercalaciones lutíticas (formación Cerrezuelo); otra media, marina, lutitas y areniscas finas (formación Cordobés) y una superior, marina costera, areniscosa media (formación La Paloma). Posteriormente, como área positiva, hacia el Cretácico, pasan a predominar esfuerzos de tensión que permiten la intrusión de filones basálticos de dirección NW.

Los *depósitos Gondwanicos* se desarrollan en el norte del país, en dos zonas subsiguientes, cuenca del NE y cuenca del NW, con características subsecuentes estructurales similares a las de la devónica. La cuenca del NE se extiende con direcciones de hundimiento NE-NW, que determinan una estructura sinclinal cerrada; la cuenca del NW se hunde regionalmente hacia el E dentro de la Argentina y hacia el N en el Brasil. Comprenden: en la base, depósitos esencialmente continentales, conglomerados tiloides, areniscas gruesas, medias y finas, ritmitos, fangolitas y limolitas (formación San Gregorio); luego, sedimentos arenosos gruesos, medios, finos y lutíticos, litoral-marinos (formación Tres Islas); después, sedimentos areniscosos finos, muy finos, limolitas y calizas, marinos (formación Frayle Muerto); arriba, lutitas y siltitos calcáreos y bituminosos (formación Mangrullo); más arriba areniscas medias, finas y muy finas y siltitos, marinos (formación Paso Aguiar); finalmente, completan la secuencia común de ambas cuencas, areniscas a veces conglomerádicas, gruesas, medias y finas, limolitas y lutitas, continentales (formación Yaguarí, inferior y superior). La cuenca del NW presenta un último episodio sedimentario, con areniscas y limolitas, y continental-eólico hacia la parte superior (formación Tacuarembó), cubriéndose arriba con un espeso manto de coladas basálticas (formación Arapey). La cuenca del NE se ve recortada por filones de basalto, a la vez que muestra la presencia de filones capa también de quimismo basáltico.

Dentro del *Cretácico Inferior* se verifican importantes procesos subsecuentes que dan lugar a dos cuencas estructuralmente asociables a fosas tectónicas: cuenca del Santa Lucía y cuenca de la Laguna Merim. La cuenca del Santa Lucía se desarrolla en el sur del país, producto de una facturación

principal E-NE. Sobre la sedimentación cretácica, con conglomerados, areniscas y lutitas (formación Miguez), se sitúan algunos depósitos del Cretácico Superior, Terciario (Mioceno) y Cuaternario, ante sucesivas retomadas, no muy importantes, del proceso subsecuente. La cuenca de la Laguna Merim se desarrolla al este del país en dirección NE, extendiéndose en territorio brasileño. Sobre la sedimentación cretácica, poco desarrollada, se verifica una relativamente importante deposición cenozoica. Hacia la base de estas cuencas se desarrollan efusivas basálticas (formación Puerto Gómez) que, hacia los bordes de la cuenca de la Laguna Merim, se encuentran sobrepuestas por efusivas ácidas (formación Arequita).

La *cuenca del Cretácico Superior* se extiende hacia el litoral oeste, como producto de una subsecuencia de amplio radio ante direcciones fundamentales NE y NW. Tiene lugar en ella una sedimentación principalmente areniscosa (formaciones Guichón, Mercedes y Asencio).

Las *cuencas cenozoicas* se componen de depósitos miocénicos y plio-pleistocénicos poco potentes, con desarrollo en relación con las cuencas cretácicas o independientemente de ellas.

#### 4. PROSPECCION GENERAL

##### 4.1. Introducción

En base a los conocimientos existentes sobre la geología del país antes resumidos, así como a los antecedentes sobre prospección presentes y a los medios disponibles se ordenaron los trabajos de prospección general como sigue (Fig. 3):

- Comenzar los mismos sobre los terrenos sedimentarios, visualizando acumulaciones de tipo arenisca, dentro de un área definida como prioritaria y constituida por las formaciones San Gregorio y Tres Islas, correspondientes éstas a los depósitos gondwanicos y devónicos [8–10].
- Continuarlos sobre los terrenos cristalinos desarrollados hacia el este del país, en busca principalmente de depósitos de tipo vetiforme [11–13].

Los antecedentes sobre prospección presentes en el país mostraban la existencia de anomalías uraníferas asociadas a las formaciones San Gregorio y Tres Islas (Gondwana) [2, 4, 5], así como a la formación Cerrezuelo (Devónico) [2, 5]. Por otra parte, el mayor número de anomalías en terrenos cristalinos se encuentra en el este del país [2].

En el Brasil se define una mineralización uranífera [14] dentro de la formación Río Bonito, correlacionable con la formación Tres Islas, así como

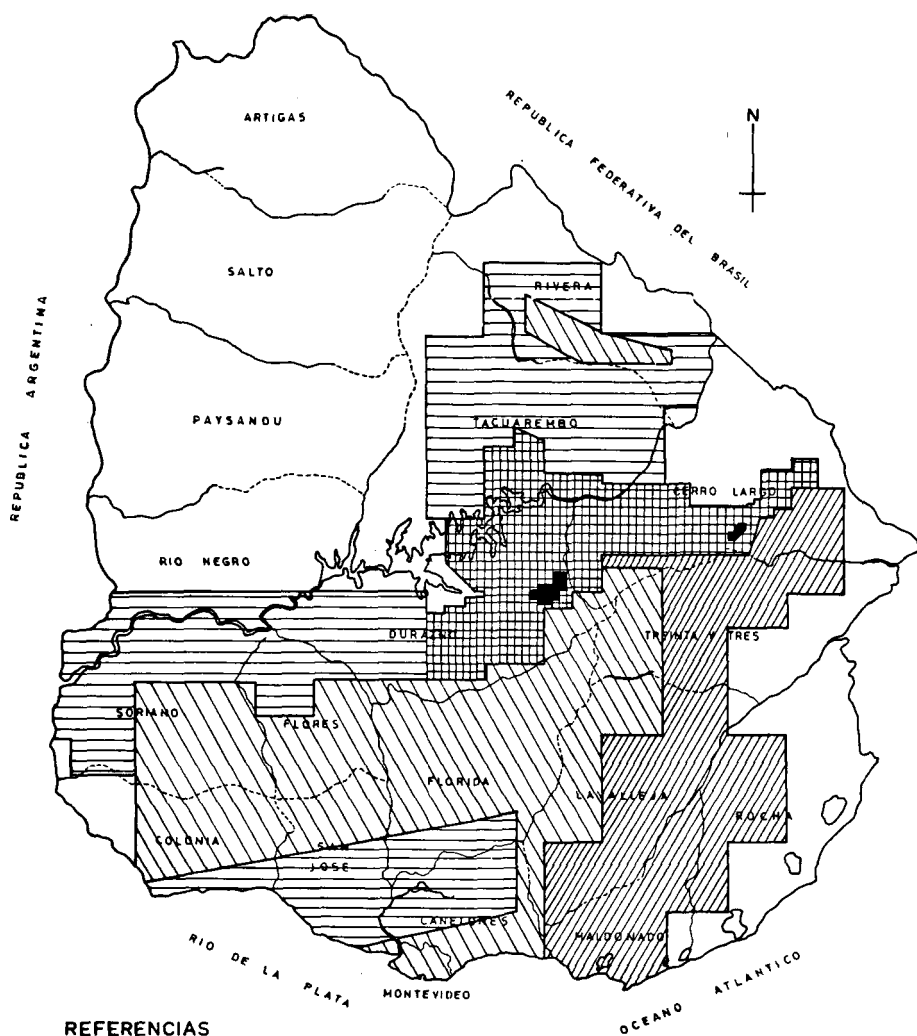


FIG.3. Trabajos de prospección general y detallada.

# CUADRO I. EXTENSION Y RESULTADOS DE LOS TRABAJOS DE PROSPECCION

	Recubrimiento		%	Anomalías			Anomalías/km		
	km	km <sup>2</sup>		1a.	2da.	3ra.	1a.	2da.	3ra.
Cuaternario	3 031	1 897	1,6			15			0,5
Cretácico	871	575	1,5	2	4	25	0,2	0,5	2,9
Basalto	641	428	1,5			7			1,1
Yaguari	215	140	1,5						
F. Muerto-Mang. Pº Aguiar	1 132	690	1,6			7			0,6
San Gregorio- Tres Islas	6 349	4 047	1,6	20	13	193	0,3	0,2	3,0
Devoniano	2 622	1 709	1,5	4	20	129	0,2	0,8	5,0
Cristalino del E	7 135	4 723	1,5	14	42	254	0,2	0,6	3,6
Cristalino del O	4 349	2 865	1,5	19	63	179	0,4	1,4	4,1
Totales	26 345	17 074	1,5	59	142	809	0,2	0,5	3,0

distintos indicios correlacionables con las formaciones San Gregorio y Tres Islas y la unidad cristalina del este y sureste [15–17].

A su vez, los medios disponibles limitaban la prospección general a la radiometría aérea. Las áreas del país arriba señaladas para ser objeto de prospección general muestran una incidencia no demasiado importante de los depósitos cuaternarios de cobertura, al mismo tiempo que una densidad aceptable de afloramientos, lo que las hace bastantes aptas para la utilización de la radiometría aérea [4]. Tal panorama cambia progresivamente hacia el S y SW del país, donde la incidencia cada vez más importante de los depósitos de cobertura y la disminución de afloramientos que se verifica, hacen bastante inapto el uso de la prospección aérea como técnica de prospección general.

## 4.2. Desarrollo del trabajo

El trabajo está siendo efectuado con un equipo reunido en la Comisión Nacional de Energía Atómica de la Argentina y cedido en préstamo.

La operación se lleva a cabo con un avión Cessna 185, mediante líneas de vuelo espaciadas cada 750 m, a una altura de vuelo media de 75 m y utilizando como elemento de referencia fotoplanos a escala 1:50 000.

La información recogida se corrige y se interpreta después estadísticamente como modelo log-normal para cada unidad geológica o conjunto separadamente. Se establecen luego curvas de isorradiactividad sobre mapas a escala 1:50 000.

#### 4.3. Resultados obtenidos

Los datos obtenidos se sintetizan en el Cuadro I.

La revisión de las anomalías indicadas en dicho Cuadro ha mostrado que las del Cretácico Superior corresponden a un incremento del fondo radiactivo asociado a procesos de silicificación.

Si bien las formaciones San Gregorio y Tres Islas han sido trabajadas conjuntamente, las consideraremos independientemente.

Para la formación Tres Islas, los valores anómalos se hallan ligados a sedimentos finos: lutitas, areniscas muy finas y finas, con materia orgánica, carbón y/o piritosas, grises o con colores de oxidación, con conteos que pueden alcanzar los 10 000 c/s y valores analíticos que llegan a 5000 ppm de U. Las litologías gruesas, areniscas medias, gruesas, gravilosas ocasionalmente, muestran valores de radiactividad elevados, circunscritos a medios ferrificados. Esas distintas litologías se intercalan, en una potencia de unos 50 m para la formación, y se sitúan entre dos niveles escasamente permeables: la unidad limolitas de la formación San Gregorio abajo, y la formación Fraile Muerto arriba. Sobre la formación Tres Islas no se han efectuado trabajos de detalle.

En la formación San Gregorio, algunas de las anomalías detectadas han sido objeto de trabajos de detalle (véase 5.1, distrito Cerro Largo Sur) y son válidas genéricamente las consideraciones que allí se hacen.

El Devónico también se trabajó en conjunto. Algunas de las anomalías presentes en la unidad de base (formación Cerrezuelo) han sido trabajadas en detalle (véase 5.2, distrito Las Cañas) y se consideran de validez general las observaciones hechas en la subsección mencionada. Las anomalías presentes en las unidades superiores (formaciones Cordobés y La Paloma) han sido interpretadas como debidas al incremento del fondo radiactivo relacionado con los niveles arcillosos presentes.

Las anomalías detectadas sobre los terrenos cristalinos muestran cierta tendencia a agruparse en las áreas graníticas; no obstante aparecen también en las áreas ectimítico-migmatíticas, a veces muy bien estructuradas en zonas de fracturas. No se han efectuado trabajos de detalle sobre ellas.

## 5. TRABAJOS DE PROSPECCION DETALLADA

Como consecuencia de los resultados obtenidos en los trabajos de prospección general, se extrajeron dos áreas a efectos de proceder en ellas a la realización de trabajos más detallados. Una de ellas corresponde a anomalías situadas dentro de la formación San Gregorio y se denominó distrito Cerro Largo Sur; y la otra a anomalías de la formación Cerrezuelo, denominada distrito Las Cañas.

### 5.1. Distrito Cerro Largo Sur

#### 5.1.1. *Antecedentes*

Los trabajos de prospección en vehículos ya habían permitido detectar algunas anomalías en esta área. Posteriormente, la prospección general aérea, además de ratificar aquellas anomalías definió nuevas zonas anómalas.

Los estudios de revisión de esas distintas anomalías, efectuados fundamentalmente con la asistencia técnica del OIEA [18], concluyeron en la necesidad de efectuar trabajos más detallados.

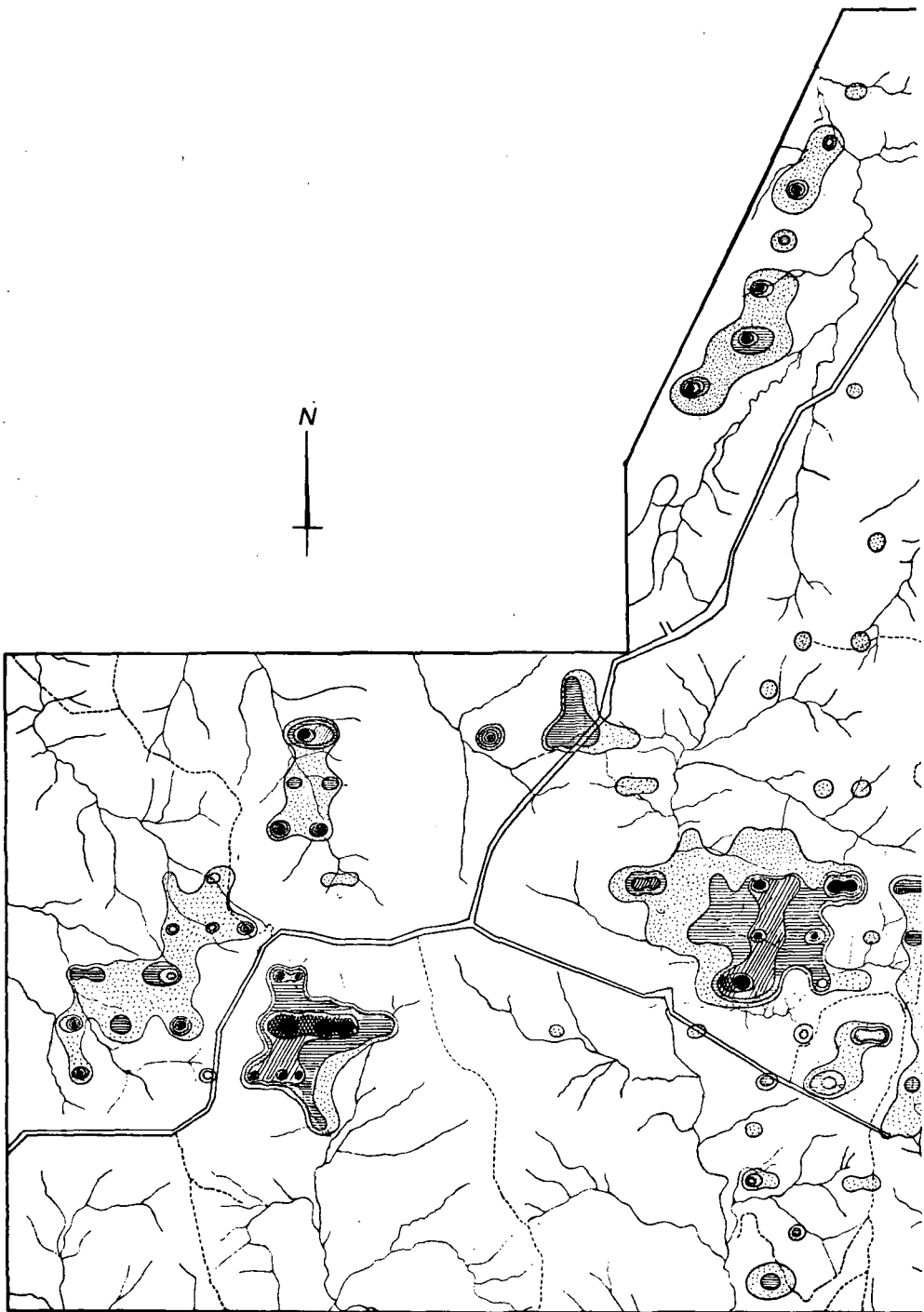
#### 5.1.2. *Trabajos efectuados*

Los estudios realizados incluyeron la realización de una carta geológica a escala 1:10 000 y distintos trabajos de prospección detallada: radiometría, emanometría, geoquímica en suelo y perforaciones.

La carta geológica permitió separar, dentro de la secuencia sedimentaria, dos unidades mayores: las formaciones San Gregorio y Tres Islas. A su vez, dentro de la primera se pudieron cartografiar cuatro unidades: limolitas (con areniscas muy finas y ritmitos), areniscas, fangolitas (con areniscas medias, finas y ritmitos) y areniscas-conglomerados. Los terrenos cristalinos, unidad del este y sureste, se sitúan hacia el este del área, a la vez que soportan la deposición sedimentaria con un accidentado paleorrelieve que distribuye en paleovalles los depósitos basales de la formación San Gregorio, principalmente las unidades fangolitas y areniscas-conglomerados. En relación con las anomalías de las prospecciones autoportada y aérea definidas en el área se pudo establecer que se situaban en la formación San Gregorio, en los niveles estratigráficos correspondientes a las unidades limolitas y fangolitas.

Los trabajos de prospección detallada, radiométricos, emanométricos y geoquímicos en suelo, se llevaron a cabo en malla con líneas cada 250 m, medidas todos los 100, y con observación continua en el caso de la radiometría.

Mediante radiometría se cubrió toda el área (Fig. 4). Los valores superiores se distribuyen en aureolas con tendencia a agruparse hacia las zonas anómalas



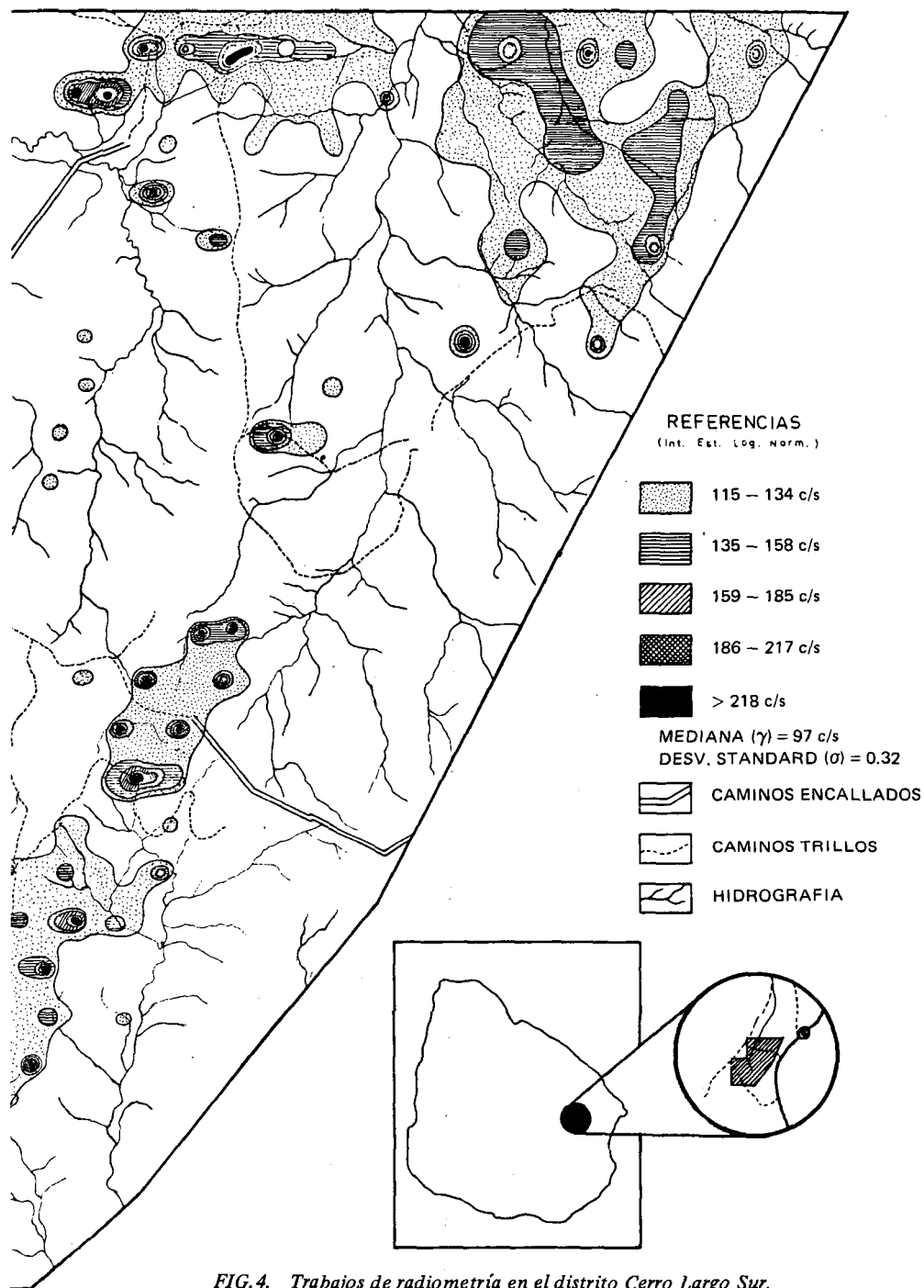


FIG.4. Trabajos de radiometría en el distrito Cerro Largo Sur.

definidas mediante la prospección aérea, sin establecer otro aporte más que una mejor definición de las mismas. Dentro de esas zonas pueden definirse puntos con valores que alcanzan o superan los 1000 c/s pero normalmente restringidos en extensión, verificándose la mejor continuidad hacia el norte del área. Los valores anómalos se ven asociados a las litologías finas de colores de oxidación secundarios, a veces grises-negras, correspondientes a las unidades cartografiadas como limolitas y fangolitas.

Con emanometría se cubrieron las cuatro quintas partes del sur del área. Los valores superiores muestran el mismo tipo de tendencias en su distribución que los de radiometría, siendo válida entonces la conclusión establecida arriba en relación con la radiometría, de no aportar más que una mejor definición respecto de la prospección aérea.

Se sacan conclusiones similares a las establecidas con radiometría, en relación con la continuidad de los valores más altos relativamente y con la asociación de los mismos a las litologías finas.

Con geoquímica se muestreó toda el área, disponiéndose de los resultados analíticos del sureste de ésta. De ellos pueden extraerse las mismas conclusiones arriba establecidas para radiometría y emanometría.

Los trabajos de perforación incluyeron hasta el momento la realización de 24 sondeos sobre un total de 1623 m perforados, con recuperación de testigos. Estos trabajos tuvieron por finalidad efectuar un reconocimiento en profundidad, a fin de aumentar el conocimiento litológico, estratigráfico y estructural del área en relación particularmente con la unidad limolitas en el norte y la unidad fangolitas-areniscas en el sureste, anómalas.

Los sondeos del sureste, en la mayoría de los casos recortaron las unidades limolitas y fangolitas, mostrando el carácter anómalo de ambas. El sondeo 1 atravesó una zona mineralizada entre 14 y 23 m, con valores de radiactividad que llegan a 1500 c/s a los 17 m y con un contenido medio de 230 ppm de  $U_3O_8$  y máximo de 450 ppm de  $U_3O_8$  entre 19,17 y 19,67 m., en litologías limolíticas-areniscas finas grises y negras. El sondeo 4 cortó una mineralización entre 34,50 m y 38,50 m, con valores de radiactividad que llegan a 1950 c/s y con un contenido medio de 180 ppm de  $U_3O_8$  y máximo de 395 ppm de  $U_3O_8$  entre 35,60 m y 36,45 m, en litologías limolítico fangolitoideas grises; y otra entre 54,50–55,00 m y 59–60 m, con valores de radiactividad de 3250 y 1150 c/s respectivamente, también en litologías limolíticas grises y negras situadas hacia el contacto superior e inferior de un nivel arenoso. Estos sondeos permitieron además comprobar la existencia de uno de los paleovalles evidenciados, definir mejor la distribución de los niveles arenosos dentro de la unidad fangolitas y comprobar el carácter secundario de los colores de oxidación que presentan en superficie las litologías especialmente finas.

Los sondeos del norte, noreste y oeste permitieron ratificar solo el carácter anómalo de la unidad limolitas, ya que no se pudieron alcanzar las unidades de la formación San Gregorio infrapuestas a ella.

### 5.1.3. Conclusiones

En base a los trabajos efectuados y con relación a las acumulaciones de uranio presentes en el área, se puede señalar:

- a) Que esas acumulaciones se encuentran asociadas a las litologías finas, limolitas y arenisca muy finas que primariamente muestran colores grises y negros, con materia orgánica y pirita, y que por alteración se ven limonítico-hematitizadas a veces intensamente. Probablemente, el uranio se encuentra asociado principalmente a la fase orgánica, bajo la forma de complejos órgano-minerales, ya que no se le ha encontrado expresado mineralógicamente. Estas litologías se sitúan en las unidades limolitas y fangolitas.
- b) Que las litologías más gruesas, correspondientes a las unidades fangolitas y, principalmente, areniscas y areniscas-conglomerados, se ven normalmente en superficie y en algunos de los sondeos que los recortan en profundidad, con colores de oxidación, producto al menos parcialmente de pirita alterada a veces muy abundante, y escasa radiactividad. Un pequeño afloramiento, correspondiente a una litología conglomerádica de matriz fina, limonítico piritoso, que ha sido preservado parcialmente de la alteración, muestra 1400 c/s.

En consecuencia, además de los mecanismos posibles de concentración en las litologías finas, quedan abiertas las posibilidades de acumulación en litologías gruesas susceptibles de existir en estado reducido debajo de la napa de agua.

## 5.2. Distrito Las Cañas

### 5.2.1. Antecedentes

La primera anomalía en esta área fue detectada en 1965 [2]. Posteriormente, en 1976 [5], durante un reconocimiento del área se detectaron nuevas anomalías con valores analíticos que llegan a 1580 ppm de U en zona con 4000 c/s. Finalmente, los trabajos de prospección general aérea ubican aquellas anomalías dentro de un área anómala extensa, lo que llevó a programar distintos trabajos de detalle en la zona.

### 5.2.2. Trabajos programados

Los trabajos de detalle incluyeron la realización de una prospección detallada aérea y una carta geológica a escala 1:20 000, así como radiometría sistemática y perforaciones en ejecución.

La prospección detallada aérea fue decidida en base a la experiencia recogida en el distrito Cerro Largo Sur. Se llevó a cabo con líneas de vuelo cada 200 m, a una altura media de 75 m, valiéndose del equipo señalado en la sección 4. Como elemento de referencia se usaron fotos aéreas a escala 1:20 000. Los valores radiométricos, una vez corregidos, se interpretaron estadísticamente asumiéndose una distribución log-normal. Con esos valores se construyeron las curvas isorradiométricas.

La revisión de campo permitió comprobar con buen acomodamiento las curvas isorradiométricas en el terreno. Este trabajo además permitió establecer que los valores anómalos radiactivos se correspondían con un estrato de una extensa continuidad lateral. En él, los valores radiométricos se mantienen por encima de los 250 c/s, superándose localmente los 10 000 c/s. La radiactividad en el estrato, a su vez, se encontraba localizada en areniscas medias, gruesas y gravillosas, ferruginosas a ferrificadas.

La cartografía geológica en realización está evidenciando tres unidades dentro de la formación Cerrezuelo y situando el estrato anómalo en la parte media de la unidad inferior.

Los trabajos de prospección sistemática se están efectuando en malla de 20 X 5 m y tienden a definir en superficie la distribución del estrato anómalo.

Los trabajos de perforación están ratificando la posición estratigráfica señalada del estrato anómalo, su continuidad en su superficie y la existencia a veces abundante de piritita limonítica-hematitizada. Se iniciaron en malla de 400 X 400 m, que se ha ampliado a 400 X 1200 m hacia la profundidad de la cuenca, en busca del estrato al estado reducido debajo de la napa de agua. Las litologías areniscosas limonítico-hematitizadas uraníferas pueden ser interpretadas como producto de la redeposición, luego de la oxidación movilizadora, del hierro y uranio presentes primeramente al estado reducido en el estrato.

## 6. CONSIDERACIONES FINALES

En base a los trabajos de prospección de uranio efectuados hasta el momento y tomando en consideración los conocimientos presentes acerca de la geología del Uruguay y de los conceptos actuales sobre acumulación de uranio, las perspectivas uraníferas en el Uruguay pueden ser establecidas como sigue:

### 6.1. Terrenos sedimentarios

Los sedimentos devónicos y las formaciones gondwánicas San Gregorio y Tres Islas se han prospectado casi en su totalidad mediante radiometría aérea, a la vez que se ha efectuado un trabajo de detalle sobre la formación

San Gregorio y que se está realizando otro sobre la formación Cerrezuelo (Devónico). Se han trabajado también con prospección aérea, autoportada o geoquímica, aunque muy parcialmente, otras formaciones gondwánicas (Fraile Muerto, Mangrullo, Paso Aguiar, Yaguarí), del Cretácico Superior (Mercedes, Asencio) y de Cretácico Inferior (Míguez).

En el Devónico se han registrado diversas anomalías asociadas a areniscas ferruginoso-ferrificadas, situadas en la formación basal Cerrezuelo, algunas de las cuales se están trabajando en detalle (distrito Las Cañas). Las perspectivas se hallan ligadas al nivel de areniscas piritoso-oxidadas, que expone las anomalías uraníferas por absorción en los óxidos de hierro que, al hundirse hacia el interior de la cuenca infrapuesto a un nivel impermeable, posibilita su reconocimiento al estado reducido debajo del nivel del agua.

En el Gondwana, en relación con la formación San Gregorio, sobre la que se hizo un trabajo de detalle (distrito Cerro Largo Sur) y la formación Tres Islas, las perspectivas se encuentran asociadas especialmente a los niveles arenisco-piritosos intercalados con los niveles finos anómalos uraníferos detectados. Ambas unidades a su vez, hacia el interior de la cuenca, se encuentran infra y sobrepuestas por niveles impermeables que posibilitan la existencia de facies reducidos bajo la napa de agua. En unidades correlacionables a éstas, del Brasil, se encuentran los depósitos de Figueira PR., así como otras manifestaciones, entre ellas la señalada en Cerro Partido Encruxilhada Do Sul. R.S.

## 6.2. Terrenos Cristalinos

Se han comenzado a prospectar recientemente mediante radiometría aérea en el este del país. Las anomalías detectadas, en conteo total, muestran tendencia a agruparse en las áreas graníticas, a la vez que se manifiestan también en las áreas ectinítico-migmáticas, a veces muy bien estructuradas en zonas tectónicamente afectadas en fase rígida. Sobre estas anomalías no se han efectuado trabajos de detalle.

En relación con la unidad "Cristalino del Centro-Suroeste" (1700–2000 m.a.) las perspectivas, además de las relacionadas genéricamente con los depósitos vetiformes, particularmente con las secuencias metamórficas grafitosas (San José), las podemos asociar a metaconglomerados cuarzo-piritosos (Arroyo Grande).

Respecto de la unidad "Cristalino del Este-Sureste" (500–700 m.a.), también son viables las posibilidades de depósitos vetiformes, además de los de uranio diseminado en correlación con los de Rossing del suroeste africano.

## REFERENCIAS

- [1] GOSO, H.J., La prospección de uranio en Uruguay. Los trabajos a realizar, Com. Nac. Energía Atómica, Montevideo, Bol. 2 (1971).

- [2] CAMERON, J., Report to the Government of Uruguay on Mission for the Prospection For Nuclear Raw Materials, Informe de Asistencia Técnica, OIEA, Viena (1965).
- [3] GRIMBERT, A., Mission en Uruguay, Section de géochimie, Département des prospections et recherches minières du Commissariat à l'énergie atomique, Paris (1966).
- [4] GOSO, H.J., SPOTURNO, J., PRECIOZZI, F., "Una metodología de prospección auto-portada, Primeros resultados obtenidos en la Cuenca del Nordeste (Uruguay)", Exploration for Uranium Ore Deposits (Actas Simp. Viena, 1976), OIEA, Viena (1976) 531.
- [5] TAYLOR, J., Programa de Prospección de Uranio, Informe al Gobierno del Uruguay, Informe de Asistencia Técnica N° 1111, OIEA, Viena (1976).
- [6] HART, S.R., Radiometric ages in Uruguay and Argentina, and their implications concerning continental drift, Geol. Soc. Amer. Ann. Meeting (1966).
- [7] UMPIERRE, M., ALPERN, M., Edades estroncio-rubidio en rocas cristalinas del sur de la República Oriental del Uruguay, Rev. Asoc. Geol. Argent. XXVI 2 (1971).
- [8] ADLER, H.H., "Concepts of uranium-ore formation in reducing environments in sandstones and other sediments", Formation of Uranium Ore Deposits (Actas Simp. Atenas, 1974), OIEA, Viena (1974) 141.
- [9] BARTHEL, F.H., "Review of uranium occurrences in Permian sediments in Europe, with special reference to uranium mineralizations in Permian sandstone", Formation of Uranium Ore Deposits (Actas Simp. Atenas, 1974), OIEA, Viena (1974) 277.
- [10] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATOMICA, "Report of Working Group II, Sedimentary basins and sandstone-type deposits", Formation of Uranium Ore Deposits (Actas Simp. Atenas, 1974), OIEA, Viena (1974) 699.
- [11] ARMSTRONG, F.C., "Uranium resources of the future – "porphyry" "uranium deposits", Formation of Uranium Ore Deposits (Actas Simp. Atenas, 1974), OIEA, Viena (1974) 625.
- [12] SMITH, E.E.N., "Review of current concepts regarding vein deposits of uranium", Formation of Uranium Ore Deposits (Actas Simp. Atenas, 1974), OIEA, Viena (1974) 515.
- [13] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATOMICA, "Report of Working Group IV, Vein- and similar-type deposits", Formation of Uranium Ore Deposits (Actas Simp. Atenas, 1974), OIEA, Viena (1974) 713.
- [14] SAAD, S., Aspectos da mineralização uranífera em Figueira PR, Com. Nac. Energ. Nucl., Río de Janeiro, Bol. 8 (1974).
- [15] FRAENKEL, M.O., Prospección de uranio na região de Cerro Partido Encruzilhada do Sul – R.S., Com. Nac. Energ. Nucl., Río de Janeiro, Bol. 4 (1974).
- [16] ANDRADE RAMOS, J.R., MACIEL, A.C., Atividades de prospecções de uranio no Brasil, 1966–1970, Com. Nac. Energ. Nucl., Río de Janeiro, Bol. 3 (1974).
- [17] ANDRADE RAMOS, J.R., MACIEL, A.C., Atividades de Prospecções de Uranio no Brasil, 1970–1974, Com. Nac. Energ. Nucl., Río de Janeiro, Bol. 4 (1974).
- [18] MUSET, J.A., Informe al Gobierno del Uruguay, Informe de Asistencia Técnica N° 1269, OIEA, Viena (1977).

## DISCUSSION

J.E. MENDOZA: Could you give us the characteristics of the anomalies in the Gondwana deposits?

H.J. GOSO: They are found associated with the San Gregorio and Tres Islas Formations. In the San Gregorio Formation, the anomalies are found associated with fine lithologies: very fine limnolites and sandstones, which

show primary grey and black colours, contain organic and pyritic material and are limonitico-haematized by weathering. The uranium is mainly found in close association with the organic phase, as an organic mineral complex. In the Tres Islas Formation, the anomalous values are again related to fine sediments: lutites, very fine and fine sandstones with organic matter, carbon and/or pyrite, grey, or coloured by oxidation.



**IV. URANIFEROUS MINERALIZATIONS;  
GEOLOGY AND MINE DEVELOPMENT**

**IV. MINERALIZACIONES URANIFERAS;  
GEOLOGIA Y DESARROLLO MINERO**



# CONSIDERACIONES SOBRE LA GEOLOGIA Y METALOGENIA DE ALGUNOS INDICIOS CHILENOS DE URANIO

M.W. FLUCKIGER, E. ABAD

Comisión Chilena de Energía Nuclear,  
Santiago

M. MARTIN

PNUD/OIEA,

Proyecto de Exploración de Uranio en Chile,  
Santiago,  
Chile

## Abstract-Resumen

### ASPECTS OF THE GEOLOGY AND METALLOGENY OF SOME CHILEAN URANIUM OCCURRENCES.

A brief description of the geology of Chile is given from approximately latitude 22–34°S as represented graphically on a 1:5 000 000-scale geotectonic map. The map shows the districts with uranium occurrences, for each of which the regional geological context, the lithological features and alteration of the surrounding rocks, the morphology and structure of the occurrences, the uranium and associated mineralization, the gangue and the mobile-to-total uranium ratio are dealt with in summary form. The matrix of correlation between the uranium, radiometric readings and other elements, the paragenetic association, the concentration factors and the origin of uranium is described. It can be used to define the metallogenical-structural classification of the more representative Chilean occurrences and makes it possible to draw some conclusions of interest in prospecting.

### CONSIDERACIONES SOBRE LA GEOLOGIA Y METALOGENIA DE ALGUNOS INDICIOS CHILENOS DE URANIO.

Se describe brevemente la geología de Chile reflejada gráficamente, desde la latitud 22° hasta la de 34°S aproximadamente, en un mapa geotectónico a escala 1:5 000 000. En dicho mapa aparecen ubicados los distritos con indicios de uranio. Para cada uno de ellos se define, en forma muy sintética, el marco geológico regional, características litológicas y alteración de las rocas encajantes, morfología y estructura de los indicios, mineralización uranífera y asociada, ganga, y la razón uranio móvil/uranio total. Se expone la matriz de correlación entre uranio, radiometría y otros elementos, la asociación paragenética, factores de concentración y origen del uranio. Ello permite definir la clasificación metalogénico-estructural de los indicios chilenos más representativos y deducir algunas conclusiones de interés para la prospección.

## 1. INTRODUCCION

Los trabajos de prospección de uranio realizados en Chile hasta la fecha han permitido localizar una serie de indicios y anomalías en diversas partes del país.

Por "indicio" entendemos aquí las manifestaciones de uranio ligadas a ciertos factores de orden estructural, mineralógico, genético, etc. que en el estado actual de la investigación presentan cierto interés, por supuesto mayor que el expresado por el término "anomalía". En el presente trabajo nos limitamos a los indicios.

Se han hecho descripciones aisladas de varios indicios en trabajos geológicos publicados o inéditos; pero faltaba un estudio específico en conjunto, en el que se tuvieran en cuenta los caracteres metalogénicos, además de los geológicos. Faltaba, igualmente, hacer una clasificación estructural y genética de los indicios y compararlos con otros del extranjero. Esta falta de investigación se pretende remediar en lo posible, con este estudio. Al mismo tiempo se desea contribuir a orientar más adecuadamente la prospección de uranio en el país, ya que ésta se encuentra en su período más activo.

Se han seleccionado los indicios que se consideran más representativos hasta la fecha. Su ubicación se refleja en la Fig. 1. A su vez se ha intentado ver si se podía deducir cierta correlación entre los ciclos o fases orogénicas y los procesos mineralizantes, por el gran interés que ello podría tener. Lo realizado en este terreno no constituye sino un ensayo muy preliminar, ya que por una parte son relativamente pocos los indicios existentes y, por otra, no se conoce aún bien el desarrollo geotectónico de Chile. No obstante, puede dar pie a una investigación futura de mayor envergadura.

De los distritos Los Azules, Estación Romero, El Tofo y Pejerreyes, sólo se han hecho estudios al microscopio de muestras esporádicas; pero esto, añadido a las observaciones de campo, puede dar suficiente consistencia a los caracteres metalogénicos deducidos. Los restantes indicios de morfología filoniana han sido objeto de estudios microscópicos de detalle, realizados por uno de los autores, Flückiger [1]. Igualmente, otro de los autores, Martín [2], recogió personalmente muestras del distrito La Piadosa e hizo estudios detallados de las mismas en laboratorio.

Por otra parte, los geólogos de la Comisión Chilena de Energía Nuclear L.E. Pérez, H. Fortín y J.L. Illanes dieron información complementaria verbal y manuscrita sobre los distritos Los Azules y Pejerreyes, por la que se les queda muy agradecidos.

## 2. TECTONICA Y TECTOGENESIS

La evolución tectónica, paleogeográfica, estratigráfica y magmática del territorio chileno comprendido en los Andes meridionales aparece estrechamente

ligada al desarrollo de ciclos tectónicos sucesivos, desde una edad precámbrica, aún poco conocida, hasta una edad fanerozoica en que se distinguen la evolución y desarrollo de dos ciclos tectomagmáticos completos: Ciclo tectónico paleoídico y Ciclo tectónico andino [3], siendo este último el original en los Andes; los ciclos anteriores presentan facies y deformaciones clásicas en otros sistemas de montaña de igual edad [4].

Los correspondientes geosinclinales evolucionaron superimponiendo parcial o totalmente sus respectivas direcciones estructurales y facies geológicas (ígneas, sedimentarias, metamórficas) sobre sistemas precedentes. Estas direcciones varían desde EW para el Precámbrico, WNW para el Paleozoico y NNW para el Mesozoico-Cenozoico [3].

Las sucesivas fases diastróficas de carácter general, ocurridas durante cada ciclo, han permitido definir pisos estructurales, según concepto de Bogdanoff (1963) y Gaernert (1963), que se presentan en el Mapa tectónico de Chile [3] como unidades tectónico-paleogeográficas esenciales, definidas principalmente por las distintas paleofacies que se desarrollan durante un mismo piso estructural.

## 2.1. Ciclos tectónicos pre-fanerozoicos

En la tectónica antártica se reconoce la existencia de un escudo y un sistema geosinclinal del Precámbrico Superior. Igual situación se reconoce en el borde sudoccidental del Escudo brasileño [3]. El Precámbrico constituye el zócalo más profundo de la Cordillera de los Andes [4].

## 2.2. Ciclo tectónico paleoídico

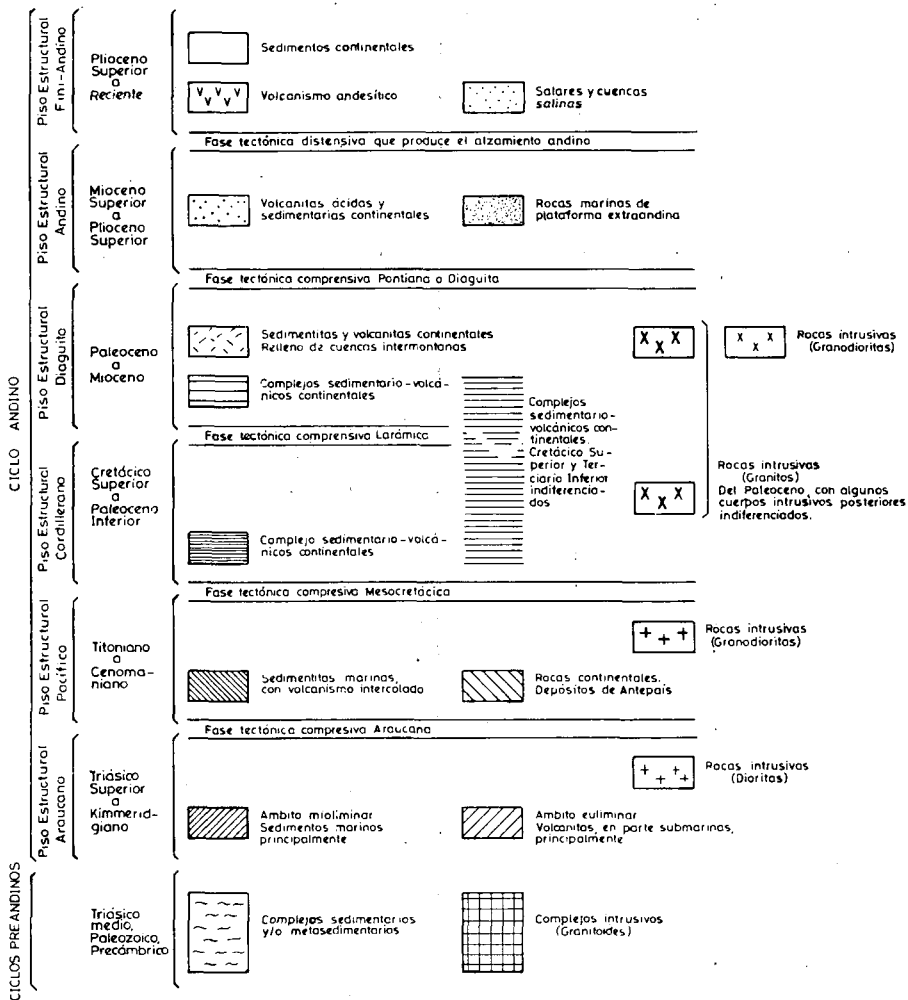
Muestra un desarrollo geosinclinal completo que, con un ámbito de dominio que abarcó Chile, Argentina y Bolivia, comenzó en el Cámbrico culminando en el Triásico con una región de Plataforma [3].

## 2.3. Ciclo tectónico andino

El desarrollo y evolución de la Cordillera de los Andes presenta diversas características en la zonas que cubren su ámbito. Las distintas fases tectónicas del Ciclo andino, que se desarrolla durante el Mesozoico y Cenozoico, no son absolutamente sincrónicas al comparar y comprobar la ligera diferencia de edades con que se producen en la parte norte y en la parte sur. También es posible comprobar una diferencia o cambio gradual entre las características de evolución típicamente geosinclinal en la zona sur extrema (Geosinclinal de Magallanes) hasta aquellos de cuenca pericontinental de tipo liminar en el centro y en el norte de Chile [3].



## L E Y E N D A



11

DISTRITO  
(Apunta hacia la ubicación)

● UBICACION DE LOS INDICIOS

- 1- TOCOPILLA
- 2- MOCTEZUMA
- 3- SIERRA GORDA
- 4- LAS ANIMAS
- 5- ALGARROBO - EL ROBLE
- 6- LOS AZULES
- 7- PAMPA LARGA

- 8- CABEZA DE VACA
- 9- CARRIZAL ALTO
- 10- LA PIADOSA
- 11- ESTACION ROMERO
- 12- EL TOFO
- 13- TAMBILLOS
- 14- PEJE FREYES

FIG.1. Mapa tectónico y relaciones con los indicios uraníferos.

El termino liminar, propuesto por Aubouin y Borello [5], describe las cadenas de tipo andino por sus originales características en contraposición con las cadenas de tipo alpino, descritas como geosinclinales en el sentido estricto.

El Ciclo andino es de primera importancia en este trabajo, pues las manifestaciones radiactivas encontradas en Chile hasta la fecha están relacionadas con él; la única excepción es el distrito de Moctezuma, que se refiere a una pegmatita y a una serie de vetas encajadas en rocas intrusivas paleozoicas.

Durante el desarrollo de los Andes se distinguen seis pisos estructurales que se caracterizan por su depositación de sedimentos, volcanismo, magmatismo intrusivo y fases tectónicas.

### *2.3.1. Piso estructural araucano*

Con posterioridad a la orogénesis hercínica, con la cual termina el Ciclo tectónico paleoídico, se inicia el Ciclo tectónico andino, cuyo desarrollo continúa hasta el presente. A partir del Triásico Superior-Jurásico Inferior, se desarrolla una cuenca de sedimentación marina activa elongada y abierta hacia el NNW en la que predominan lavas andesíticas con intercalaciones sedimentarias marinas en su borde occidental (facies euliminar), y sedimentos fosilíferos, en gran parte calcáreos, en su borde oriental (facies mioliminar).

Las series jurásicas aparecen afectadas por un movimiento tectónico compresivo (inicialmente de tipo epeirogénico), que se puede ubicar en el Kimmeridgiano, condicionando una regresión general de los mares jurásicos [3]. Asociada a esta tectónica (fase orogénica Araucana o Nevadiana) se presenta una fase intrusiva de composición diorítica. Estas dioritas son roca huésped de algunos indicios uraníferos filonianos hipotermales, como los de los distritos de Tocopilla, Las Animas y Carrizal Alto (Fig. 1).

### *2.3.2. Piso estructural pacífico*

Con posterioridad a la fase orogénica nevadiana y durante todo el Cretácico Inferior se inicia un período de tectónica distensiva que origina una nueva ingresión marina (Cuenca titoniano-neocomiana), que cruza en forma diagonal la cuenca jurásica anterior [3], dando origen a la depositación de potentes secuencias calcáreas. Con los movimientos de relajamiento de la compresión se desarrollan cuencas continentales y, hacia el fin del Cretácico Inferior, se inicia un período sedimentario continental principalmente de ambiente desértico con el que se intercalan e interdigitan, en cambio de facies, episodios volcánicos [3].

Al comenzar el Cretácico Superior, se origina una etapa tectónica compresiva (fase orogénica Mesocretácica o Su-Hercínica) a la cual se asocia una fase intrusiva de composición principalmente granodiorítica. Los plutones granodioríticos son roca de caja para filones hipotermales con manifestaciones uraníferas

similares a los encontrados en las dioritas jurásicas antedichas, como por ejemplo los distritos Algarrobo-El Roble y Tambillos (Fig. 1). Además se han encontrado manifestaciones radiactivas relacionadas con filones hipotermales ubicados en aureolas de contacto de estos intrusivos, afectando rocas volcánicas del Jurásico, como en El Tofo, y del Cretácico, como en los distritos Estación Romero y Pejerreyes (Fig. 1).

La orogénesis mesocretácica corresponde tanto desde el punto de vista paleogeográfico como tectónico a la fase orogénica principal de la evolución del sector central (geoliminar) de los Andes meridionales [6]; con ella terminan las facies marinas características del Cretácico Inferior y la paleogeografía liminar produciéndose una emersión generalizada del dominio andino [6].

Su presencia permite separar en la historia de la cadena un período geoliminar (Jurásico-Cretácico Medio) de un período tardiliminar que comienza durante el Cretácico Superior.

### *2.3.3. Piso estructural cordillerano*

La tectónica compresiva de la fase orogénica mesocretácica continúa con pulsaciones hasta el Terciario Inferior. Los plegamientos producidos en este período, acompañados a veces de fallas inversas de gran ángulo, son de gran magnitud, sobreyponiéndose y ocultando fácilmente las estructuras precedentes [3]. Las rocas afectadas quedaron constituyendo cordones topográficos-estructurales de relieve suave, orientados en posición N-S aproximadamente. Se produjo una fuerte erosión acompañada de un intenso volcanismo andesítico.

En el Cretácico Superior-Terciario Inferior se produce una nueva tectónica compresiva, la fase orogénica Larámica, que tiene relacionado el magmatismo intrusivo granítico-granodiorítico. En esos plutones del Paleoceno se encuentran chimeneas de brecha que presentan indicios de uranio, los distritos de Sierra Gorda, Los Azules y Cabeza de Vaca y filones mesotermales como en el distrito Pampa Larga (Fig. 1).

### *2.3.4. Piso estructural diaguita*

Con el cese paulatino de la compresión de la orogénesis larámica se inicia una tectónica distensiva que se caracteriza por una intensa actividad volcánica. Esta distensión se va acentuando durante todo el Cenozoico [3].

Sin embargo, en el Eoceno Superior-Oligoceno se produjo una nueva compresión, fase orogénica Incaica [7], que plegó las volcanitas del Terciario Inferior, y tuvo lugar un cuarto magmatismo intrusivo, granodiorítico, asociado.

Esta fase compresiva es la última de gran consideración y es posible considerar aquí el fin del período tardiliminar del Ciclo andino, iniciándose un período post-liminar.

### 2.3.5. *Piso estructural andino*

Posteriormente se produce una erosión intensa y tiene lugar una tectónica distensiva acompañada de volcanismo ácido. No obstante, en el norte chileno se evidencia durante el Mioceno Superior una pulsación tectónica que se traduce en una suave compresión. Este sería, pues, el último movimiento compresivo que habría afectado a las rocas que estarían formando, en el norte de Chile, la actual Cadena Andina [3]. Esta fase tectónica corresponde a la fase Pontiana [7].

Durante el Plioceno Superior se hace más marcada la distensión, con fuerte dislocamiento por grandes fallas normales y movimiento diferencial de bloques, con lo que se generan numerosas fosas, orientadas N-S y el consecuente alzamiento de la Cadena Andina [3].

### 2.3.6. *Piso estructural fini-andino*

Esta etapa se caracteriza por un movimiento tectónico de cizallamiento de carácter continental, evidenciado por la existencia de grandes fallas transcurrentes de rumbos aproximadamente E-W, que se muestra especialmente activo durante el Pleistoceno [3].

Cabe destacar que el volcanismo más moderno, causante de los rasgos geomorfológicos principales del Cordón Andino, estaría intimamente ligado a los dos últimos tectonismos [3].

## 3. DESCRIPCION DE LOS INDICIOS

Los indicios radiactivos reconocidos hasta la fecha en Chile están relacionados en general con yacimientos de otros minerales, principalmente de cobre, y la mayor parte se ha encontrado en las minas o vecindades de éstas. De ahí que los nombres dados a los indicios corresponda a los distritos mineros cercanos, nombres conocidos en la mayor parte de los casos por la gran importancia de algunas minas en un pasado próximo.

### 3.1. Distrito Tocopilla

El distrito cuprífero de Tocopilla (Fig. 1) corresponde a un sistema de vetas emplazado en un extenso plutón de composición predominantemente granodiorítica, el cual intruye a rocas volcánicas de la formación La Negra. Esta se compone de coladas andesíticas con cantidades subordinadas de brechas andesíticas, areniscas volcánicas e ignimbritas ácidas; su edad es jurásica media a superior [8, 9].

Estas vetas forman un sistema complejo, donde se distinguen 6 principales, de rumbos sensiblemente paralelos y de dirección N 70° E. En el sector de la mina Minita, la inclinación es de 60° al S, y en el sector de la mina Despreciada es casi vertical. La separación de las vetas principales es de 10 a 50 m y sus tramos mineralizados tienen de 1 a 2 m de ancho [10]. La mineralización explotable alcanzaba, en el año 1961, una profundidad de 670 m [8]. Actualmente sólo se trabajan algunos desmontes y labores superficiales.

La roca de caja corresponde a una monzodiorita cuarcífera compuesta por andesina, hornblenda, ortoclasa y cuarzo, como minerales esenciales, y zircón, apatita y mineral opaco, como minerales accesorios. En la parte alta de la mina Minita, adyacente a una de las vetas, esta roca se ha transformado en agregado de cuarzo, biotita y limonita.

La mineralización metálica consiste principalmente en pirita y calcopirita, con cantidades subordinadas de magnetita, hematita y molibdenita, en una ganga de actinolita, cuarzo, calcita, clorita y cantidades pequeñas de apatita.

La mineralización radiactiva asociada consiste en uraninita, la cual se encuentra relacionada principalmente con la calcopirita. También aparecen fuertes anomalías radiactivas asociadas con clorita, la cual forma las salbandas de las vetas [8].

La sucesión mineralógica probable es la siguiente, por el orden que se cita: actinolita, apatita, cuarzo 1, magnetita, hematita, pirita, calcopirita y uraninita, molibdenita, cuarzo 2, calcita y clorita.

### 3.2. Distrito Moctezuma

El distrito Moctezuma está constituido por una mina importante de cuarzo, pequeñas labores para la obtención de cobre y algunas pequeñas manifestaciones de hierro. Los indicios radiactivos encontrados en este distrito están relacionados con estas mineralizaciones. Este distrito está emplazado en un cuerpo intrusivo granítico que intruye esquistos micáceos y anfibolitas del Paleozoico Inferior y/o Precámbrico Superior (Fig. 1). Este plutón está cubierto en forma discordante por queratófiros y tobas de edad triásica y por las formaciones Moctezuma, de edad liásica y Limón Verde de edad bajociana, ambas de origen marino [11, 12, 13].

La mina de cuarzo Tulipán ha sido trabajada mediante un rajo de 20 m de diámetro y una profundidad de 10 m. Este yacimiento consiste en una masa de cuarzo pegmatítico estéril, en cuyo borde norte existe una zona de feldespatos compuesta por ortoclasa y cantidades subordinadas de albita, cuarzo y moscovita. El feldespato aparece fracturado, limonitizado y reemplazado por calcita en las proximidades de las fracturas, encontrándose en éstas la mineralización consistente en magnetita y hematita, en ganga de biotita, clorita y cuarzo, con abundantes vetillas de yeso.



*FIG.2. Distrito Moctezuma, mina Tulipán. Cristales de zircón asociado con mineral opaco (magnetita, hematita) en ganga de biotita y clorita. Luz transmitida nicoles Xs, 40X.*

La mineralización radiactiva se ha emplazado en esta zona de feldespatos a favor del fracturamiento, el cuál sigue direcciones muy variables. Las vetillas mineralizadas, las cuales forman acumulaciones en algunos sectores, tienen corridas cortas, normalmente menores de 1 m y potencias que no exceden de 2 cm. Los minerales radiactivos consisten en zircón fuertemente alterado y alanita en cristales euhedrales de hasta 1,5 cm de largo (Fig. 2).

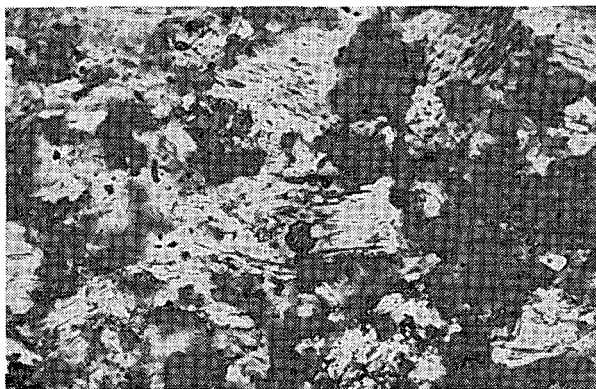
La mineralización de cobre de este distrito se presenta en una serie de vetas que tienen una radiactividad anómala de hasta 12 veces el fondo normal del cuerpo granítico. La mineralización observada corresponde a hematita, limonita, cuarzo y minerales secundarios de cobre. Estas vetas aún no han sido estudiadas con detalle.

### **3.3. Distrito Sierra Gorda**

Algunas minas del distrito de Sierra Gorda (Fig. 1) presentan indicios de radiactividad. Se encuentran emplazadas en un intrusivo de composición granodiorítica, con fases locales de granitos y aplitas, que intruye a la formación La Negra, constituida principalmente por lavas andesíticas de edad jurásica media a superior [14].

Las minas San Armando y Salvadora corresponden a zonas de complejo e intenso fracturamiento, las cuales han sido explotadas por cobre mediante rajes de 10 a 20 m de profundidad y algunas labores subterráneas.

Los sondeos realizados en la mina Salvadora hasta profundidades de 246 m indican que existe en profundidades un cuerpo mineralizado con características de chimenea de brecha que no presenta anomalías radiométricas [15].



*FIG.3. Distrito Las Animas. Pequeños cristales de uraninita dentro de clorita. Luz transmitida, nícoles //s, 100X.*

La roca encajante es un granito compuesto por cuarzo y ortoclasa que se encuentra fuertemente sericitizado y turmalinizado. La mineralización se dispone rellenando fracturas o como impregnación en la roca.

La mineralización radiactiva de la mina San Armando corresponde, en la zona de oxidación, a metazeunerita o metatorbernita acompañada de atacamita y limonita [15]. En la mina Salvadora corresponde a autunita o metaautunita asociada principalmente con salitre. Otros minerales presentes incluyen atacamita, crisocola, limonita, cuarzo y turmalina. La mineralización hipógena [15] consiste en pirita y calcopirita, con cantidades pequeñas de molibdenita.

### 3.4. Distrito Las Animas

Las vetas cupríferas que integran este distrito (Fig. 1) están emplazadas en un intrusivo predominantemente tonalítico que intruye a rocas metasedimentarias e intrusivas, principalmente filitas y tonalitas de edad paleozoica y a rocas volcánicas andesíticas jurásicas. Hacia el E el batolito está cortado por rocas intrusivas granodioríticas y adamelíticas asignadas al Cretácico [14].

La estructura en la que se emplazan las minas de este distrito corresponde a una veta que presenta una fuerte curvatura. En el sector E del distrito presenta un rumbo N 50°W. En el sector central el rumbo es de N 80°W y en el lado W es francamente E-W. El manteo general es de 75° al S. Su potencia varía entre 0,7 y 1,2 m y su corrida alcanza 2500 m.

Esta veta ha sido trabajada hasta los 540 m de profundidad [16]. Actualmente sólo se trabajan algunos desmontes.



FIG.4. Distrito Algarrobo-El Roble. Alanita (oscura) entrecrecida con anfíbola. Luz transmitida, nícoles //s, 40X.

La roca encajante es una diorita cuarcífera compuesta por andesina, hornblenda, cuarzo, ortoclasa y biotita, como minerales esenciales y rutilo y mineral opaco, como minerales accesorios. Adyacente a la veta se observa una alteración de los feldespatos a sericita y de los minerales ferromagnesianos a clorita. También se observa biotita de origen posterior en agregados de cristales finos y como vetillas delgadas que cortan la roca.

La mineralización metálica consiste en pirita y calcopirita, con cantidades subordinadas de magnetita y hematita. La ganga consiste en actinolita, cuarzo, calcita, clorita y biotita.

La mineralización radiactiva de la mina Progreso corresponde a uraninita y alanita. La uraninita aparece en cristales euhedrales de tamaño entre 0,01 y 0,02 mm, dentro de clorita y alanita, produciendo en ellas halos de radiactividad (Fig. 3).

La sucesión mineralógica probable es la siguiente: uraninita, actinolita, alanita, cuarzo 1, magnetita, hematita, pirita, calcopirita, cuarzo 2, calcita y clorita.

### 3.5. Distrito Algarrobo-El Roble

Este distrito cuprífero (Fig. 1) está constituido por 20 vetas emplazadas en un plutón tonalítico que intruye rocas metasedimentarias e intrusivas de edad paleozoica y rocas estratificadas andesíticas de edad jurásica [14, 17].

Las vetas son sub-paralelas, de rumbo variable entre N 60° E y N 80° E y de fuerte manteo hacia el N. La separación entre las vetas es muy irregular. Sus corridas varían entre 200 y 800 m y sus potencias son cercanas a 1 m. Algunas de las minas del distrito han sido explotadas por cobre hasta 400 m de profundidad [18].



*FIG.5. Distrito Algarrobo-El Roble. Uraninita dentro de alanita y clorita, produciendo halos de radiactividad. Luz transmitida, nícoles //s, 100X.*

La roca encajante de la mina Viuda corresponde a una diorita cuarcífera compuesta por andesina, clinopiroxeno, cuarzo, ortoclasa, anfíbola y biotita, con mineral opaco y apatita como minerales accesorios. Adyacente a la veta, los feldespatos están fuertemente alterados a sericita y a un agregado de sericita y calcita. Los minerales ferromagnesianos han sido alterados a clorita y están impregnados fuertemente por limonita, la cual además forma numerosas vetillas que cortan la roca.

La mineralización metálica consiste principalmente en calcopirita y pirita, con cantidades subordinadas de magnetita y hematita, en ganga de actinolita, cuarzo, calcita y clorita.

La mineralización radiactiva de la mina antes mencionada consiste en uraninita y alanita. La uraninita se presenta en pequeños cristales euhedrales de formas regulares y diámetro medio de 0,02 mm, dentro de cristales de alanita y clorita, produciendo en estos minerales halos de radiactividad (Figs 4, 5).

La sucesión mineralógica probable es la siguiente: uraninita, actinolita, alanita, cuarzo, hematita y magnetita, pirita, calcopirita, calcita y clorita.

### **3.6. Distrito Pampa Larga**

Las minas que forman el distrito Pampa Larga (Fig. 1) han sido explotadas con regular intensidad por plata, arsénico y antimonio. Se encuentran en el borde del plutón de Pampa Larga, el cual corresponde a un gabro en la zona adyacente al contacto, haciéndose cada vez más ácido alejándose de él y llegando a ser una albitita en el núcleo de la intrusión. Este intrusivo ha sido afectado

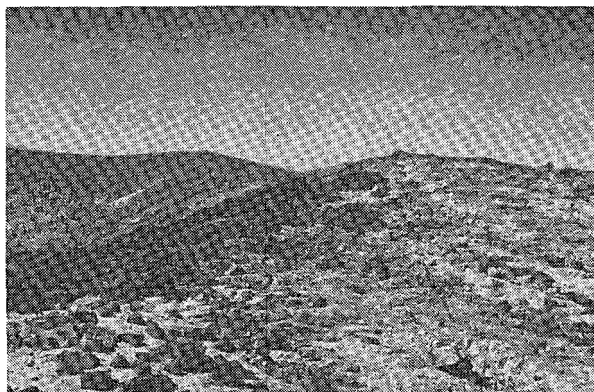


FIG. 6. Distrito Cabeza de Vaca. Afloramiento de un pequeño cuerpo de brecha. Diámetro entre 2 y 4 m.

por fuerte alteración, la cual ha producido intensa escapolitización y zeolitización de la roca [19]. Este plutón intruye la formación Cerrillos, de edad cretácica superior, compuesta por areniscas, conglomerados volcánicos, tobas y brechas con cantidades algo menores de coladas de andesita [20, 21].

Las vetas de este distrito forman dos sistemas: uno principal de rumbo N-S y otro secundario E-W.

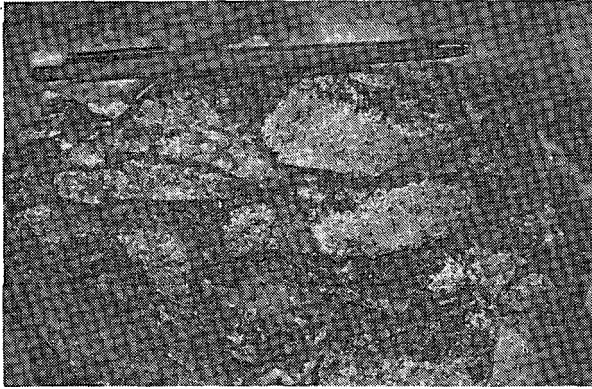
La mina descubridora consiste en una veta principal de rumbo general N-S con manteo de  $70^\circ$  a  $80^\circ$  al W. Su potencia varía entre 1,5 y 2 m y su corrida llega a 3 km. La veta secundaria es de rumbo E-W, de manteo vertical y menor potencia. La mina Alacrán consiste en 2 vetas, una de rumbo  $N 75^\circ W$  y manteo de  $55^\circ$  a  $65^\circ$  al W y otra de rumbo  $N 15^\circ E$  a  $N 25^\circ E$  y manteo de  $55^\circ$  a  $65^\circ$  al W. Sus potencias son de 20 a 30 cm. La mina María Catalina es una veta de rumbo  $N 10^\circ W$  y manteo de  $70^\circ$  a  $80^\circ$  al W. Su potencia varía entre 0,4 y 0,7 m y su corrida sobrepasa los 300 m.

La roca encajante de la mina Alacrán consiste en un agregado de plagioclasa, escapolita y diópsido. En la mina María Catalina es un agregado de escapolita y diópsido. Adyacente a las vetas se encuentra, en forma relativamente abundante, pirita en cristales euhedrales pequeños.

La mineralización metálica de estas vetas consiste en antimonita, pirita, calcopirita, bornita, argentita, blenda, galena, skutterudita, arsenopirita y arsénico nativo. La ganga consiste en cuarzo, calcita y baritina.

La mineralización radiactiva en la mina Alacrán consiste en pechblenda asociada con cuarzo y antimonita; en las minas Descubridora y María Catalina en torbenita asociada principalmente con yeso [19].

Como minerales secundarios se ha encontrado limonita, yeso eritrina, minerales oxidados de cobre y óxidos de manganeso.



*FIG.7. Distrito Cabeza de Vaca, mina Remolinos. Clastos de la brecha cementados por cuarzo y turmalina.*

### 3.7. Distrito Cabeza de Vaca y Los Azules

Los yacimientos cupríferos que constituyen estos distritos (Fig. 1) corresponden a chimeneas de brecha encajadas en un plutón granodiorítico. Este intruye la formación Cerrillos, de edad cretácica superior, compuesta por tobas, areniscas, conglomerados y brechas vulcanógenas y cantidades subordinadas de andesita. Igualmente intruye la formación Hornitos, compuesta por tobas e ignimbritas riolíticas, andesitas, conglomerados, areniscas y algunas intercalaciones de calizas lacustres, de edad terciaria inferior [20, 21, 22].

Las chimeneas de brecha tienen formas subcilíndricas y de gran verticalidad, con diámetros por lo general menores de 50 m (Fig. 6). Están constituídas por clastos de formas poligonales de igual litología que la roca encajante y de un tamaño que varía entre algunos centímetros y algunos decímetros. Han sido explotados por cobre hasta profundidades superiores a los 100 m.

La mina Remolinos del distrito Cabeza de Vaca, por ejemplo, está encajada en una monzodiorita cuarcífera compuesta por andesina, cuarzo, ortoclasa, anfíbola y biotita, con mineral opaco, zircón y apatita como minerales accesorios. Ha sufrido una alteración cuarzo-sericítica y se encuentra fuertemente fracturada hasta unos pocos metros del contacto con la brecha.

Los clastos de la brecha han sufrido una fuerte alteración cuarzo-sericítica, observándose además un aumento en la cantidad de ortoclasa hacia el borde del clasto.

La mineralización primaria consiste en calcopirita y piritita con cantidades subordinadas de hematita. La ganga consiste principalmente en cuarzo y turmalita, minerales que de preferencia cementan los clastos de la brecha (Fig. 7).

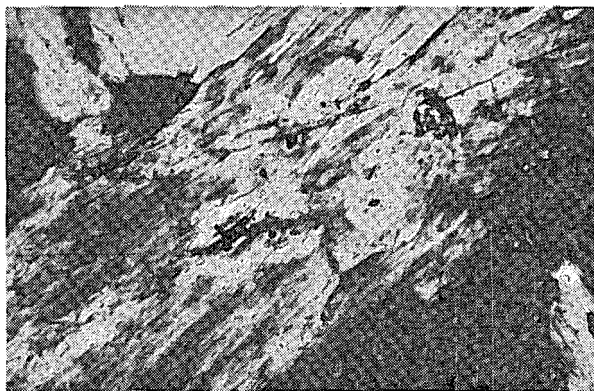


FIG.8. Distrito Carrizal Alto. Cristales de uraninita en clorita, produciendo halos de radiactividad. Luz transmitida, nícoles Xs, 100X.

En el distrito Cabeza de Vaca se han encontrado anomalías de hasta 500 c/s, sobre un valor de fondo de 200 c/s del intrusivo, asociadas a desmontes provenientes de la zona de oxidación, en los que se encuentra crisocola, atacamita, azurita, limonita, cuprita y cobre nativo.

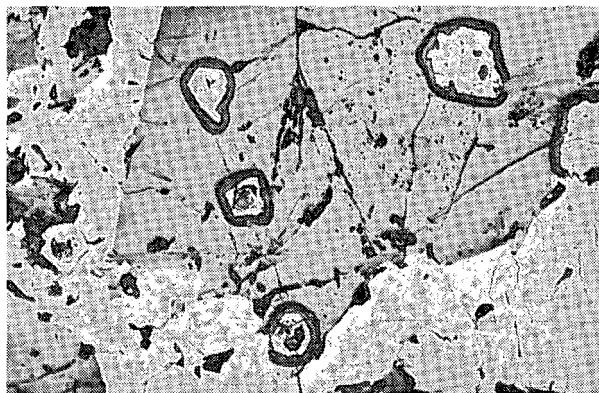
En la mina Romero, del distrito Los Azules, se ha determinado una radiometría media de 750–800 c/s, sobre un fondo de 200 c/s en el intrusivo. Valores puntuales en el interior de las labores han dado hasta 9000 c/s. En esta mina se ha encontrado torbernita asociada con limonita (Pérez y Fortín, información verbal).

### 3.8. Distrito Carrizal Alto

Este distrito cuprífero (Fig. 1) de gran importancia en el pasado, está formado por 7 vetas emplazadas en un complejo intrusivo diorítico, el cual intruye rocas paleozoicas constituidas por cuarcitas, esquistos y filitas. Este plutón es intruido hacia el E por granodioritas de edad cretácica [21, 23].

Las vetas son subparalelas de rumbo E a ENE, con manteo variable entre 35°N y 80°N y corridas entre 700 y 2800 m. La separación entre las vetas varía entre algunas decenas de metros y 400 m. La veta más importante es la Principal, la cual en los sectores altamente mineralizados alcanza una potencia de 4 a 5 m, llegando excepcionalmente a 13 m. La mayoría de las minas fueron trabajadas hasta los 500 ó 600 m de profundidad, medidos según la inclinación de las vetas [10, 24].

La roca encajante de la veta Principal corresponde a una diorita cuarcífera, compuesta por andesina-labradorita, anfíbola, cuarzo y pequeña cantidad de ortoclasa. Adyacente a la veta, los feldespatos están fuertemente alterados a sericita



*FIG.9. Distrito Carrizal Alto. Cristales subhedrales de uraninita produciendo halos de radiactividad en alanita (gris), acompañados de pirrotita (blanco). Luz reflejada, 75X.*

y la anfíbola ha sido alterada a clorita. Llama la atención la presencia de biotita posterior, la cual se presenta alterada a clorita. También aparecen cúmulos de clorita entre los cristales alterados del feldespato y algunos granos de mineral opaco dispersos en la roca.

La mineralización metálica consiste principalmente en pirita y calcopirita, con cantidades subordinadas de arsenopirita, pirrotita, hematita y magnetita. La ganga consiste en actinolita, cuarzo, calcita y clorita.

Muestras radiactivas provenientes de los demontes de las minas Panteón y Contadora Alta indican que los minerales radiactivos son uraninita y alanita. La uraninita se presenta en cristales subhedrales de diámetro entre 0,01 y 0,2 mm, dentro de cristales de clorita y alanita, produciendo en ellos halos de radiactividad (Figs 8, 9).

Para las minas de este distrito, Ruiz [10, 24] menciona además la presencia de tetrahedrita, molibdenita y cobaltita.

La sucesión mineralógica probable es la siguiente: uraninita, actinolita, alanita, magnetita y hematita, pirita, arsenopirita y pirrotita, calcopirita, cuarzo, calcita y clorita.

### 3.9. Distrito Estación Romero

Está constituido por una serie de vetas cupríferas emplazadas en el contacto entre rocas andesíticas de la formación Bandurrias (Cretácico Inferior) y granitoides del Cretácico Medio [25]. Todas las vetas manifiestan caracteres metalogénicos análogos, aunque algunas son intragraníticas con facies marginales,

y otras se emplazan en brechas y andesitas igualmente marginales, algunas aparentemente formando colgajos ("roof pendants") en los granitoides.

Se describe a continuación, como tipo representativo, el registro anómalo radiométrico de más alto rango. Este indicio se encuentra en Quebrada La Arena e incluye dos estructuras paralelas de dirección aproximada N 50°E y buzamiento subvertical. Se ha hecho, como también en las otras vetas del distrito, rajos, socavones y galerías (actualmente inactivos) para obtención de cobre.

Las rocas encajantes presentan aspectos de rocas híbridas, es decir, aparentan productos de transformación de probables andesitas por efectos de la intrusión de los granitoides adyacentes. La roca huésped tiene estructura cataclástica y refleja una alteración hidrotermal, enmascarada por efectos supergénicos posteriores. La alteración afecta también a las rocas encajantes, formando una banda en torno a las estructuras.

No se ha observado a la vista minerales discretos de uranio. La radiometría máxima puntual detectada en granzas de desmonte es de 5500 c/s, con fondo de 100 c/s. El contenido (igualmente máximo puntual) de uranio móvil y total es de 195 y 264 ppm respectivamente.

En la zona de oxidación aparecen compuestos supergénicos de cobre y hierro.

La asociación mineralógica observada en algunas muestras puntuales es la siguiente: actinolita, alanita y cuarzo; en otras vetas se ha observado también magnetita, hematita, clorita, epidota y calcita.

### 3.10. Distrito El Tofo

Las manifestaciones radiactivas de este sector se encuentran en las vecindades del yacimiento de hierro El Tofo (de gran importancia en un pasado próximo), de donde viene la denominación de distrito El Tofo (Fig. 1).

En el sitio específico considerado se encuentran cuatro vetas de mineralización de hierro y cobre en la superficie descompuesta, emplazadas en andesitas pertenecientes a la zona de contacto de rocas volcánicas jurásicas con granitoides jurásicos y cretácicos [25, 26].

Las labores de explotación de cobre en la veta principal constituyen la mina de Tierra Colorada que, en la actualidad, se encuentra aterrada. La veta tiene una dirección aproximada N-S y manto de unos 50°W.

Las rocas encajantes son andesitas afaníticas recristalizadas y alteradas. La roca huésped constituye una cataclasita intensamente alterada por efectos hidrotermales y supergénicos.

La asociación mineralógica de las vetas, observada en muestras puntuales, es la siguiente: magnetita, hematita, biotita, clorita y cuarzo, apareciendo en la zona de oxidación atacamita y crisocola, además de limonita.

En una muestra se encontraron placas de torbernita depositadas a favor de planos de fractura. Muy probablemente provienen de la alteración oxidante de

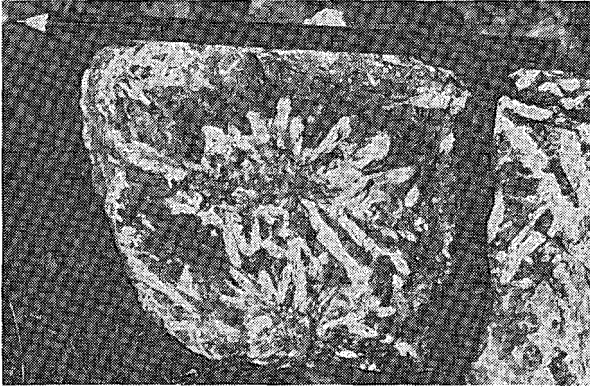


FIG.10. Distrito Tambillos. Cristales de apatita (blancos) en un agregado de actinolita, magnetita y apatita.

minerales primarios de uranio que existen o pueden haber existido en la zona reductora de la veta.

### 3.11. Distrito de Tambillos

Este distrito está constituido por varias minas de cobre que son el resultado de la explotación de vetas emplazadas en un intrusivo granodiorítico, el cual intruye rocas de la formación Arqueros, de edad neocomiana (Fig. 1). Esta formación se compone principalmente de andesitas y brechas volcánicas, con dos intercalaciones sedimentarias calcáreas marinas [27].

Las vetas se presentan en tres sistemas, cuyas orientaciones son: N 50° E a 80° E, N 30° W a N 60° W y E-W. Las radiactivas corresponden al primer sistema y se encuentran en su gran mayoría dentro del intrusivo [27].

La mina San Felipe se ha desarrollado siguiendo una veta de rumbo N 63° E con manteo de 40° a 50° al SE y de potencia variable entre 1 y 4 m. La mina Bellavista corresponde a una veta de rumbo N 70° con manteo de 50° a 70° al SE y una potencia entre 1 y 2 m. Las labores principales de ambas minas consisten en niveles horizontales los cuales sobrepasan los 300 m de longitud.

La roca encajante de la mina Bellavista corresponde a una diorita compuesta por andesina-labradorita y clinopiroxeno con mineral opaco como accesorio. Cerca de la veta, los feldespatos están fuertemente sericitizados y los piroxenos fracturados y alterados a clorita a través de las fracturas. Además se encuentran diseminados algunos cúmulos de clorita y calcita.

La mineralización consiste en magnetita con cantidades subordinadas de pirita y calcopirita. La ganga está formada por actinolita y apatita, con una pequeña cantidad de calcita y clorita. Cuadra [28] menciona además la presencia

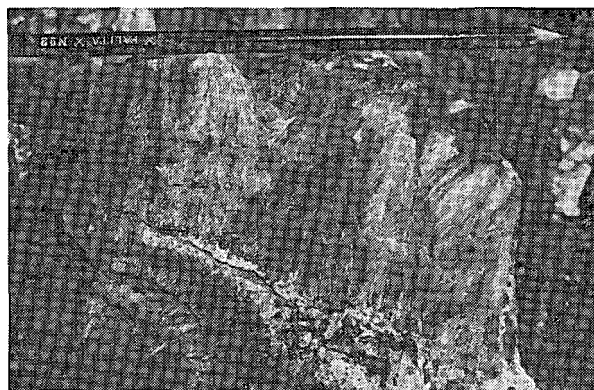


FIG.11. Distrito Tambillos. Agregado de cristales fibrosos de actinolita.

de pequeñas cantidades de arsenopirita, molibdenita, turmalina y epidota (Figs 10, 11).

Las muestras radiactivas de las minas San Felipe y Bellavista consisten en abundante magnetita con pequeña cantidad de pirita.

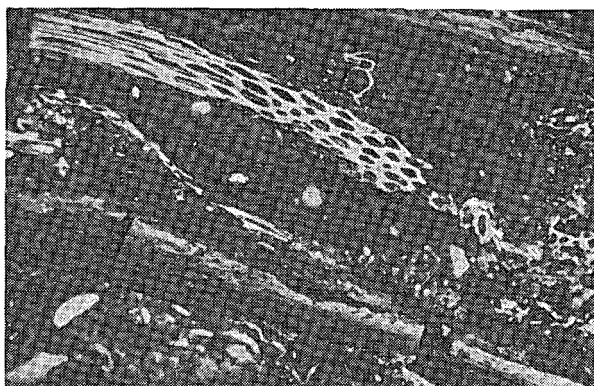
No se pudieron identificar minerales primarios de uranio. En este distrito Lee y Rapaport [29] encontraron metatorbernita y pechblenda en la mina Carmen. En la mina San Felipe se han encontrado minerales radiactivos que, en parte, parecen corresponder a torbernita.

La sucesión mineralógica probable es la siguiente: apatita y actinolita, magnetita y arsenopirita, pirita y molibdenita, calcopirita.

### 3.12. Distrito Pejerreyes

La estructura tipo de este distrito cuprífero corta una secuencia de rocas estratificadas compuestas por niveles de andesitas con intercalaciones menores de riolitas, areniscas tobáceas y calizas de la formación Arqueros (Cretácico Inferior). Dicha secuencia está en contacto con granitoides del Cretácico Medio [30]. En la zona de contacto los granitos presentan variaciones mineralógicas, granulométricas y de color, e igualmente de radiometría. Se pueden diferenciar microgranitos con 200 c/s, granitos de grano medio y color rosado con 500 c/s y granitos biotíticos de grano grueso con 70–90 c/s.

La estructura consta de una serie de vetas asociadas, constituyendo en conjunto una corrida visible de 300 m de largo y potencia media de 8 m, con rumbo aproximado N 30°E y 45°W de manteo. Hay una serie de fracturas secundarias más o menos perpendiculares a la corrida filoniana. Existen trabajos mineros para obtención de cobre, actualmente inactivos.



*FIG.12. Distrito La Piadosa. Placa de textinita (blanco), detritos de paredes celulares y de huminita. Aparecen también dos bandas de huminita masiva. Luz incidente, inmersión en aceite, 300X.*

Las rocas estratificadas encajantes están muy afectadas por efectos de metamorfismos de contacto.

Las vetas están constituídas por cataclasitas de andesitas y aplitas silicificadas.

En la zona de oxidación aparecen compuestos supergénicos de cobre.

La asociación mineralógica observada en algunas muestras puntuales de las vetas es la siguiente: magnetita, hematita, actinolita y cuarzo.

No se han observado a la vista minerales discretos de uranio. La radiometría en las vetas varía entre 250 y 1000 c/s, siendo la máxima puntual de 3000 c/s. El fondo es de unos 150 c/s. El contenido máximo puntual de uranio móvil y total es de 3166 y 3146 ppm.

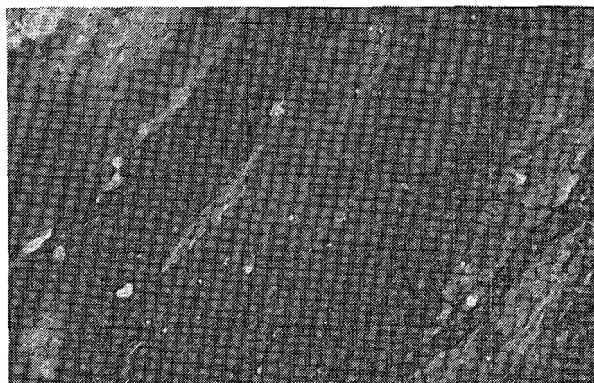
Hay varios diques aplíticos en los granitos cretácicos de las cercanías con ligeras anomalías radiométricas. Varían de 400 a 500 c/s sobre un fondo entre 100 y 150 c/s.

### **3.13. Distrito La Piadosa**

Este indicio radiactivo se encuentra en una mina explotada por cobre, llamada La Piadosa (Fig. 1).

Se localiza en sedimentos fluviales recientes que constituyen una pequeña terraza formada por gravas, arenas y limos, entre los que se intercalan lechos con sustancias carbonosas depositados sobre la formación Lagunillas [31], de edad jurásica constituida por brechas, areniscas rojas y andesitas de carácter continental. Algo más de 1 km al oriente aparecen granitos rosados del Paleozoico [3], con radiactividad de fondo relativamente elevada.

La terraza tiene una altura entre 4 y 10 metros sobre la superficie actual del río Ramadillas, una longitud de unos 300 m y 15 m de anchura promedio. Se



*FIG. 13. Distrito La Piedadosa. Productos húmicos masivos, compactos y gelificados con distinta reflectividad. Luz incidente, inmersión en aceite, 300X.*

intercalan varios niveles carbonosos, de los cuales sobresalen dos por su potencia superior a 0,5 m de espesor promedio. En los niveles carbonosos se localiza el uranio, con el que se asocia cobre en forma de minerales supergénicos, que destacan por su tonalidad verde.

En una visita a la zona se recogieron dos muestras de los niveles uraníferos para proceder al análisis mineralógico del material y estudiar la distribución y estado del uranio en relación con sustancias carbonosas.

El material analizado contiene aproximadamente un 70% de componentes orgánicos y un 30% de componentes inorgánicos.

Los constituyentes orgánicos corresponden a material leñoso humificado, con grado bajo de gelificación, equivalente a turbas o lignitos de muy bajo rango.

Dichos constituyentes corresponden, por una parte, a membranas celulares y tejidos diversos, asimilables al maceral textinita, en grado ínfimo de evolución y, por otra, a huminita masiva o pulverulenta sin textura celular, con horizontes y aureolas de distinta reflectividad, pero siempre inferior a la que presenta la textinita (Figs 12, 13).

Entre los componentes inorgánicos son esenciales los productos arcillosos. Como minerales accesorios aparecen yeso, moscovita, biotita alterada y cuarzo.

Para conocer la asociación y estado del uranio se ha realizado un fraccionamiento densimétrico de dos muestras por medio de centrifugadora, empleando como líquidos separadores tetracloruro de carbono y bromoformo. Se han observado varias fracciones desde menos de 1,59 hasta más de 2,9 de densidad, las cuales contienen gradualmente separados los componentes orgánicos e inorgánicos. El análisis químico de uranio y porcentaje en cenizas han permitido trazar las curvas de la Fig. 14, que representa la distribución del uranio en función del contenido en materia orgánica de las distintas fracciones densimétricas.

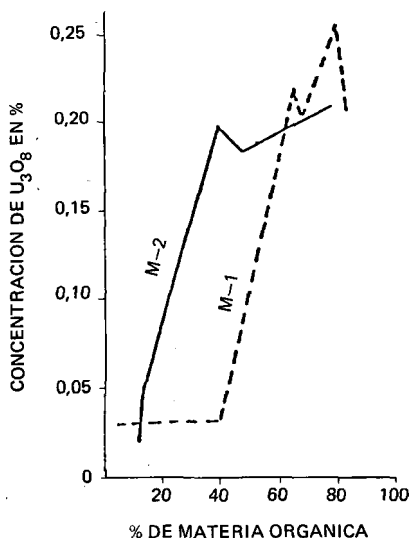


FIG.14. Concentración de  $U_3O_8$  en las fracciones densimétricas en relación con su contenido de materia orgánica.

Se ve claramente que existe una relación bastante perfecta y positiva entre el uranio y la materia orgánica.

Se averiguó asimismo que desde el punto de vista químico, los ácidos húmicos constituyen el 87% del material orgánico, y que el 67% del uranio se asocia a dichos ácidos.

Se deduce que el uranio no se encuentra en forma de minerales discretos, sino en forma de complejos uranio-orgánicos, que constituyen fundamentalmente una entidad común con los ácidos húmicos de la turba.

#### 4. RAZON URANIO MOVIL ( $U_m$ )-URANIO TOTAL ( $U_t$ ) EN MUESTRAS PUNTUALES DE LOS INDICIOS

Se analizaron muestras puntuales de cada veta, seleccionándose para el cálculo de la razón  $U_m/U_t$  las que dieron una ley superior a 15 ppm.

Es sabido que el concepto de uranio móvil es relativo. Aquí se asume como el resultante del ataque en caliente de un 85% de  $NO_3H$  y un 15% de  $ClH$ . La extracción para el análisis de uranio total se hizo mediante una mezcla de  $ClO_3H + NO_3H + FH$ .

Los resultados del análisis se reflejan en el Cuadro I. Puede verse que la razón  $U_m/U_t$  es alta en todos los distritos, lo que demuestra que el uranio se

CUADRO I. COMPARACION DEL CONTENIDO MEDIO DE URANIO MOVIL (Um) CON EL DE URANIO TOTAL (Ut) EN MUESTRAS PUNTUALES DE LOS INDICIOS

Distrito	N° de muestras	Um en ppm	Ut en ppm	Razón Um/Ut
Tocopilla	1	146,0	149,0	0,98
Moctezuma	2 <sup>a</sup>	67,5	138,0	0,49
	13 <sup>b</sup>	48,4	143,9	0,62
Sierra Gorda	3	381,9	396,9	0,88
Las Animas	2	903,9	936,4	0,97
Algarrobo-El Roble	1	170,0	173,0	0,98
Pampa Larga	3	428,7	517,9	0,83
Los Azules-Cabeza de Vaca	8	79,8	153,8	0,47
Carrizal Alto	2	713,9	715,9	0,99
Estación Romero	5	86,3	110,7	0,78
El Tofo	11	235,4	302,2	0,71
Tambillos	3	646,2	649,9	0,78
Pejerreyes	6	514,0	520,0	0,92

<sup>a</sup> Muestras correspondientes a la Mina Tulipán.

<sup>b</sup> Muestras correspondientes a otras vetas del distrito.

encuentra en forma de minerales propios u otro estado de fácil recuperación, aún en los distritos en los que no se ha podido observar dichos minerales. Solo un pequeño porcentaje de uranio parece estar ligado a fases mineralógicas refractarias, por ejemplo alanita, zircón u otros. Este porcentaje es mayor en la mina Tulipán de Moctezuma y en Cabeza de Vaca-Los Azules, en los que la razón Um/Ut es menor.

##### 5. COEFICIENTES DE CORRELACION DEL URANIO CON OTROS METALES

Además del Um y Ut se ha hecho el análisis de Cu, Pb, Zn, Ag, Co y Mn, en las mismas muestras que figuran en el Cuadro I. Son los elementos cuyo análisis

se está haciendo actualmente de rutina, dentro del Proyecto de Prospección de Uranio entre la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

Se ha calculado la media aritmética de los contenidos en el conjunto de 60 muestras, resultando los valores que figuran en el Cuadro II, debajo de los símbolos correspondientes.

Aprovechando el programa de computación GESTAT de R.G. Garret, del Servicio Geológico de Canadá, se ha calculado la matriz de correlación entre todos los elementos analizados, a los que se ha agregado la radiometría correspondiente.

El Um y el Ut muestran un índice de correlación muy alto, lo cual es lógico, dados los resultados de la razón correspondiente que aparece en el Cuadro I. Es algo menor dicho índice entre uranio y radiometría, lo cual puede indicar la existencia de desequilibrio radiactivo y/o que además del uranio puedan existir otros elementos emisores de radiactividad.

También existe correlación positiva, aunque de índices bajos, del Um con Cu y Ag; y lo mismo del Ut con Cu, Ag y Co. Como puede verse en la descripción de los indicios, en todos ellos aparecen componentes de cobre, y en muestras del distrito de Pampa Larga se han observado al microscopio minerales propios de plata y cobalto.

## 6. ASOCIACION PARAGENETICA

En este capítulo no se hace referencia al indicio de morfología estratiforme La Piadosa.

Al final de la descripción de los indicios filonianos y chimeneas de brecha se indica la asociación mineral que se supone originada en el proceso mineralizante. Cuando se pudo hacer un muestreo y estudio microscópico de más detalle, se expone la sucesión mineralógica probable.

La asociación paragenética permite deducir que la concentración del uranio es de tipo engénico de alta temperatura, ligada a fases pegmatíticas, hipotermas y mesotermas. La frecuencia de uraninita y alanita corroboran esta hipótesis, así como los minerales asociados, magnetita, actinolita, etc. en los indicios filonianos. La pechblenda propiamente dicha sólo se ha visto en Pampa Larga; pero está asociada con minerales de arsénico, níquel y cobalto que forman la clásica asociación mesotermal. Estudios sobre la asociación cuarzo-turmalina en las chimeneas de brechas demuestran igualmente temperaturas altas de formación [32].

En ningún indicio se han podido deducir asociaciones epitermales típicas. Los minerales de cobre están siempre presentes, generalmente en forma de sulfuros; en realidad, la fase cuprífera es la principal, y la uranífera es subordinada.

CUADRO II. MATRIZ DE CORRELACION

	Rad <sup>a</sup>	Um	Ut	Cu	Pb	Zn	Ag	Co	Mn
Media de contenidos, en ppm	1278,0 c/s	257,1	311,3	15 932,5	268,4	166,2	2,5	138,6	2553,8
Rad	1	0,44	0,46	-0,14	0,10	0,01	0,09	0,04	-0,12
U Móvil		1	0,95	0,16	0,03	-0,13	0,23	0,01	-0,12
U Total			1	0,21	0,01	-0,11	0,23	0,20	-0,11
Cu				1	-0,12	-0,14	-0,04	0,27	-0,08
Pb					1	0,73	0,68	0,04	0,02
Zn						1	0,40	0,01	0,01
Ag							1	0,01	0,02
Co								1	0,06
Mn									1

<sup>a</sup> Radiometría en cuentas/s. Instrumento SPP2-NF.

En las zonas supergénicas suele haber gran dispersión de minerales secundarios predominantemente de cobre y de hierro, entre los que a veces aparece torbernita.

Los minerales de ganga más comunes son cuarzo, actinolita, clorita, turmalina, biotita y calcita.

## 7. FACTORES QUE CONTROLAN LOS INDICIOS

En el indicio estratiforme “La Piadosa”, los factores de concentración del uranio son fundamentalmente de orden físico-químico, en el sentido de que el uranio se va concentrando en los componentes de la turba debido a la gran capacidad de ésta para fijar el uranio.

Todos los demás indicios están controlados por factores esencialmente de orden estructural, en el sentido de que la asociación mineral formada en el proceso metalizante aparece relleno de fracturas asociadas con vetas y diques, formados a su vez a favor de discontinuidades mecánicas en las rocas. En los tipos “chimeneas de brecha”, las estructuras son semicirculares e igualmente formadas a favor de espacios abiertos en las rocas encajantes.

Hay algunos indicios filonianos en los que también parecen intervenir factores físico-químicos; se hace referencia a los que aparecen en contacto inmediato a próximo entre rocas intrusivas y rocas más básicas, por ejemplo volcanitas andesíticas. La diferencia de basicidad en los tipos rocosos determina un ambiente físico-químico diferente, cuyo contraste puede favorecer una concentración cuprouranífera. Tal vez por esto, independientemente de los indicios considerados en las anomalías de uranio en Chile, son más frecuentes las que presentan estas relaciones de contacto.

## 8. ORIGEN DEL URANIO

El origen del uranio en La Piadosa es lógico suponer que sea la precipitación directa de este metal en las sustancias orgánicas a partir de soluciones acuosas superficiales. Es sabido que dichas sustancias manifiestan una gran reactividad química con el uranio cuando se encuentran en los primeros estadios de la carbonización o de la diagénesis, es decir, principalmente al estado de ácidos húmicos [33], como en el caso de “La Piadosa”. En este sentido se clasifica la concentración como singenética. Lo más probable es que el área fuente del uranio la constituyan los granitos palcozoicos situados aguas arriba, en los que dicho metal estaría en forma dispersa y/o concentrada en algún yacimiento, de donde sería lixiviado y transportado por soluciones acuosas descendentes. Sin embargo, no se descarta la hipótesis de que el origen del uranio pueda estar relacionado, aunque de forma indirecta, con aguas vulcánicas, tal como sugieren Bowes et al. [16].

CUADRO III. CLASIFICACION DE LOS INDICIOS SEGUN CONSIDERACIONES MORFOLOGICAS Y GENETICAS

Distrito	Morfología	Tipo	Rocas encajantes		
			Intru-sivas	Volcanitas estratific.	Sediment. carbonos.
Tocopilla	Filoniano	Hipothermal	+		
Moctezuma	Filoniano	?	+		
	Filoniano	Pegmatítico	+		
Sierra Gorda	Chimenea de brecha	Hipothermal	+		
Las Animas	Filoniano	Hipothermal	+		
Algarrobo-El Roble	Filoniano	Hipothermal	+		
Pampa Larga	Filoniano	Mesothermal	+		
Carrizal Alto	Filoniano	Hipothermal	+		
Los Azules-C. de Vaca	Chimenea de brecha	Hipothermal	+		
Estacion Romero	Filoniano	Hipothermal		+	
El Tofo	Filoniano	Hipothermal		+	
Tambillos	Filoniano	Hipothermal	+		
Pejerreyes	Filoniano	Hipothermal		+	
La Piadosa	Estratiforme	Singenética			+

Para todos los demás indicios se postula la hipótesis de un origen profundo y ascendente del uranio, acorde a las teorías metalogénicas clásicas sobre la formación de yacimientos pegmatíticos e hidrotermales. Se deduce, sobre todo, por la asociación paragenética de alta temperatura que los caracteriza.

La concentración uranífera se correspondería con fases póstumas del proceso petrogenético que dió origen a los plutones con los que se relacionan estas vetas.

De acuerdo con esta hipótesis genética, los indicios chilenos descritos difieren sustancialmente de la mayoría de los yacimientos filonianos de Europa y Estados Unidos que existen en los granitos o en su inmediata vecindad. Estos se caracterizan por una asociación paragenética típicamente epitermal. Se supone

que el uranio contenido en algunos componentes del granito regional en forma de uraninita submicroscópica o fijado en microfisuras sin formar minerales propios es puesto en movimiento por soluciones geotermales y depositado, según un régimen epitermal, en fracturas con ambiente físico-químico favorable. La lixiviación del uranio disperso es favorecida por efectos tectónicos y de alteración. Esta teoría es reforzada por el hecho de que los yacimientos filonianos epitermales de uranio suelen estar relacionados con granitos llamados fértiles, es decir, con altos contenidos medios de uranio (entre 5 y 10 ppm de uranio total) y que suelen ser alcalino-potásicos, con moscovita [34–37].

Los indicios chilenos no están relacionados con granitos moscovíticos; suelen ser granitos biotíticos o granitoides más básicos.

## 9. CLASIFICACION METALOGENICA-ESTRUCTURAL DE LOS INDICIOS

En el Cuadro III se hace una clasificación de los indicios chilenos seleccionados de acuerdo con la morfología y consideraciones de orden genético.

Se catalogan como filonianos los indicios cuyos afloramientos presentan una geometría lineal bien definida. Se definen como chimeneas de brecha los que presentan aspectos cilíndricos con fuerte verticalidad. Hay solamente uno, La Piadosa, con morfología estratiforme evidente.

Las consideraciones metalogénicas se simbolizan por la denominación “tipo”. En este aspecto, se clasifican todos los indicios, a excepción del de La Piadosa, por la supuesta temperatura de la depositación del uranio.

Las vetas a las que se hace relación en el distrito Moctezuma no se definen debido a que no han sido suficientemente estudiadas.

En el mismo cuadro se indica con una cruz la clase de roca encajante en la que se enraiza cada indicio.

## 10. CONCLUSIONES

Se exponen a continuación las conclusiones de mayor interés. De las cuatro últimas se deducen guías evidentes de prospección.

- 1) El análisis geológico, mineralógico y metalogénico de los indicios considerados ha permitido hacer, por primera vez en Chile, una clasificación estructural y genética de los mismos (Cuadro III). Esta puede considerarse, en principio, representativa de todas las manifestaciones importantes de uranio existentes hasta la fecha.
- 2) El filón pegmatítico y otras vetas del distrito de Moctezuma posiblemente se asocia con el magmatismo intrusivo del Ciclo tectónico paleoóidico. Los filones hipotermales se asocian con el magmatismo intrusivo de las fases

orogénicas Araucana y mesocretácica. Las chimeneas de brecha hipotermas y los filones mesotermas se relacionan con el magmatismo intrusivo de la fase orogénica Larámica.

- 3) Los factores que controlan todos los indicios son principalmente de carácter estructural, a excepción del de La Piadosa.
- 4) Las vetas uraníferas se relacionan con granitoides que van desde granitos propiamente dichos hasta dioritas, lo que las diferencia de los filones epitermales intragraníticos o periplutónicos de otros países, que se relacionan con leucogranitos de moscovita.
- 5) Son frecuentes los indicios asociados con facies de borde de cuerpos plutónicos, o que tienen relaciones de contacto con rocas estratificadas, o se ubican en la vecindad inmediata de dichos cuerpos.
- 6) Todos los indicios se asocian con mineralizaciones de cobre. En realidad, el uranio constituye un metal subordinado con relación a dicho elemento.

## REFERENCIAS

- [1] FLUCKIGER, M., Estudio de las manifestaciones radiactivas del norte de Chile, Univ. de Chile, Depto. de Geol., Santiago, 1978.
- [2] MARTIN, M., Análisis Mineralógico y Metalogénico de Carbones Uraníferos Procedentes de la Terraza "La Piadosa" (Chile), Inf. de la JEN, Madrid, 1975.
- [3] FRUTOS, J., FERRARIS, F., Mapa tectónico de Chile, II Congreso Latinoamericano de Geología, Caracas, Venezuela (1973).
- [4] AUBOUIN, J., BORELLO, A.V., CECIONI, G., CHARRIER, R., CHOTIN, P., FRUTOS, J., THIELE, R., VICENTE, J.C., Esquisse paléogéographique et structurale des Andes méridionales, Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn., V. XV 1-2 (1973) 11-72.
- [5] AUBOUIN, J., BORELLO, A.V., Chaînes andines et chaînes alpines: regard sur la géologie de la Cordillère des Andes au parallèle de l'Argentine moyenne, Bull. Soc. Géol. Fr. VIII 7 (1966) 1050.
- [6] VICENTE, J.C., CHARRIER, R., DAVIDSON, J., MPODOZIS, A., RIVANO, S., «La orogénesis subhercínica: fase mayor de la evolución paleogeográfica y estructural de los Andes Argentino-Chileno Centrales», Quinto Congreso Geológico Argentino (Actas 5° Cong. Geol. Arg., Buenos Aires, 1972) Vol. V (1974) 81-98.
- [7] CHARRIER, R., VICENTE, J.C., "Liminary and geosyncline Andes: major orogenic and synchronous evolution of the central and austral sectors of the southern Andes", Upper Mantle Symp. Buenos Aires, II (1970) 451-470.
- [8] KLOHN, E., Yacimientos de cobre y uranio en el distrito minero de Tocopilla, Univ. de Chile, Depto. de Geol., Santiago, Tesis de Título, 1961.
- [9] PALACIOS, C., Geología y metalogénesis de la formación volcánica La Negra y las rocas graníticas en el área de Tocopilla, Provincia de Antofagasta, Univ. de Chile, Depto. de Geol., Santiago, Publ. N° 43 (1974).
- [10] RUIZ, C., Geología y Yacimientos Metalíferos de Chile, Inst. de Invest. Geol., Santiago (1975).

- [11] BAEZA, L.G., Geología de Cerritos Bayos y areas adyacentes entre los 22° 30' - 22° 45' latitud sur y los 68° 55' - 69° 25' longitud oeste, II Región- Antofagasta, Chile, Univ. del Norte, Depto. de Geol., Chile, Memoria de Título, 1976.
- [12] HARRIGTON, I., Geology of parts of Antofagasta and Atacama provinces, Northern Chile, Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 45 2 (1961) 169-197.
- [13] PEREZ, E., LEVI, B., Relación estratigráfica entre la formación Moctezuma y el granito subyacente, Calama, Provincia de Antofagasta, Chile, Inst. de Minas de Chile, Rev. Minerale 74 (1961) 39-48.
- [14] MERCADO, M., Geología de la Cordillera de la Costa entre Chañaral y Caldera, Región de Atacama, Inst. de Invest. Geol., Santiago, Carta Geol. de Chile 27 (1978).
- [15] SERRANO, M., Geología del distrito de cobre-uranio de Sierra Gorda, provincia de Antofagasta, Chile, Univ. de Chile, Esc. de Ing., Santiago, Memoria de Título, 1961.
- [16] BOWES, A., KNOWLES, P.H., SERRANO, M., KLOHN, E., MORAGA, A., GRUENWALD, R., Exploración de minerales radiactivos en Chile. Segunda parte, provincias de Atacama y Coquimbo, Inst. de Invest. Geol. Santiago, Bol. 22 (1966).
- [17] INSTITUTO DE INVESTIGACIONES GEOLOGICAS, Mapa Geológico de Chile, escala 1:1 000 000, Santiago (1968).
- [18] SALAS, A., Informe de Estudio Radiométrico del Distrito "Algarrobo" y "El Roble", Corp. de Fomento de la Producción, Santiago (1952).
- [19] SALAS, A., Estudio geológico minero del distrito de Pampa Larga, Copiapó, Univ. de Chile, Esc. de Ing., Santiago, Memoria de Título, 1954.
- [20] SEGERSTROM, K., PARKER, R.L., Cuadrángulo Cerrillos. Provincia de Atacama, Inst. de Invest. Geol., Santiago, Carta Geol. de Chile A 2 (1952).
- [21] ZENTILLI, M., (1974) Geological
- [21] ZENTILLI, M., Geological evolution and metallogenetic relationship in the Andes of northern Chile between 26° and 29° south, Queen's University, Kingston, Ontario, Ph. D Thesis, 1974.
- [22] ABAD, E., "Las formaciones Cerrillos y Hornitos al norte de Vallenar. Provincia de Atacama, Chile", Primer Congreso Geológico Chileno, Santiago (1976) A 97.
- [23] ABAD, E., Compilación Geológica del Distrito Cuprífero Carrizal Alto y Zonas Adyacentes, III Región, Atacama, Inf. de la Com. Chilena de Energía Nuclear, Santiago (1976).
- [24] RUIZ, C., Informe Sobre los Yacimientos de Uranio Existentes en el Distrito de Carrizal Alto, Corp. de Fomento de la Producción, Santiago (1952).
- [25] MOSCOSO, R., Avance Geológico de las Hojas Vallenar-La Serena. Escala 1:100 000, Inst. Invest. Geol., Santiago (1977).
- [26] PIRACES, R., Mapa Geológico de los Cuadrángulos Cruz Grande y El Tofo, IV Región Coquimbo. Escala 1:100 000, Inst. Invest. Geol., Santiago (1976).
- [27] MUNCHMEYER, C., Geología general del distrito minero de Tambillos, provincia de Coquimbo, Primera parte, Univ. de Chile, Depto. de Geología, Santiago, Tesis de Título, 1972.
- [28] CUADRA, P., Estudio metalogénico de la mineralización de cobre-uranio de los yacimientos vetiformes del distrito minero de Tambillos, IV Región, Coquimbo, Univ. de Chile, Depto. de Geol., Santiago, Tesis de Título, 1978.
- [29] LEE, H.V., RAPAPOT, I., Reconnaissance Survey for "Uranium" Deposits in Chile, Santiago, USAEC/CORFO (1950).
- [30] THOMAS, H., Geología de la Hoja Ovalle, Provincia de Coquimbo, Inst. de Invest. Geol., Santiago, Bol. N° 23 (1967).

- [31] JESEN, O., Geología de la cordillera de los nacientes del río Copiapó entre los 27° 53' y los 28° 20' lat. sur, Prov. de Atacama, Chile, Univ. de Chile, Depto. de Geol., Santiago, Memoria de Título, 1976.
- [32] SILLITOE, R.H., SAVWKINS, F.J., Geologic, mineralogic and fluid inclusion studies relating to the origin of copper-bearing tourmaline breccia pipes, Chile, Econ. Geol. 66 (1971) 1028–1041.
- [33] MARTIN, M., "Consideraciones sobre el papel que desempeñan las sustancias orgánicas naturales de carácter húmico en la concentración del uranio", Formation of Uranium Ore Deposits (Act. Simp. Atenas, 1974), OIEA, Viena (1974) 125–137.
- [34] ARRIBAS, A., Caracteres geológicos de los yacimientos españoles de uranio, *Estudia Geologica IX* (1975) 7–63.
- [35] GEFFROY, J., SARCIA, J., La notion de gîte épithermal uranifère, Coll. Soc. Eur. Ener. Atom., Madrid (1957).
- [36] GEFFROY, J., SARCIA, J., Quelques remarques relatives à la géochimie des filons épithermaux à pechblende, Bull. Soc. Géol. Fr. VIII 6 (1958).
- [37] MARTIN, M., Notas sobre la Mineralogía del Uranio y sus Yacimientos, Inf. de la JEN, Madrid, 1975.

## DISCUSSION

E. PARDO: What mineralogical U-Cu relationship exists in the Chilean uraniferous areas where this association is found?

M.W. FLUCKIGER: In the case of hypothermal copper deposits, where most knowledge exists about this relation, both the copper and the uranium are part of the same genetic process, as can be deduced from the known mineralogical succession. In these beds, we can say in general that the first minerals to be deposited are uraninite, alanite and actinolite; later we get magnetite and haematite, then pyrite and chalcopyrite, and finally quartz, calcite and chlorite.

MORALES: What is the uranium/thorium ratio in the Moctezuma mine and what is the total uranium/mobile uranium value in this high-temperature mineral? In Peru we have a similar radioactive manifestation in the Pedregal Gorge 40 km to the east of Lima, in an association similar to that of Moctezuma in Chile.

M.W. FLUCKIGER: I don't have any values for the thorium content. The total uranium/mobile uranium ratio is about 0.5 and this leads me to believe that in addition to the uranium bound to refractory mineralogical phases there may also be some uranium in an easily recoverable state.

R.J. WRIGHT: I would like to ask the speaker whether there is information on the thorium content of, first, uraninite in the veins and, second, the veins as a whole.

M.W. FLUCKIGER: Unfortunately no analyses have yet been made of thorium or uraninite in the veins. I suspect the concentration should be relatively high.

A.E. BELLUCO: Have the results from the occurrences you described been extrapolated to the host geological environments to produce an ordered classification of the geological uraniferous favourability of the country? What area of Chile has so far been prospected and what effort has been put into exploration?

M.W. FLUCKIGER: The data from this work have not yet been extrapolated to establish an ordered system of geological uraniferous favourability for Chile. I have only tried to show here what is really well known at present; this must be supplemented by the large quantity of information gathered during the last three years of prospecting, when the work has focused mainly on the location of deposits in sedimentary areas. During these three years, geochemical studies of drainage sediments and rocks, car-borne radiometry and aerial prospecting have been used to cover a total area of approximately 105 000 km<sup>2</sup>.

L.E. PEREZ: I just wanted to comment on the thorium contents of the occurrences that Mr. Flückiger mentioned. Although no chemical analysis for this element has been made, we can say that the spectrometer measurements show the uranium/thorium ratio to be between 15:1 and 20:1 in most cases.



# MINERALIZACION DE URANIO EN ROCAS VOLCANICAS TERCIARIAS DE LA FORMACION LOS FRAILES, BOLIVIA

A. APARICIO

Comisión Boliviana de Energía Nuclear,  
La Paz, Bolivia

## Abstract—Resumen

### URANIUM MINERALIZATION IN TERTIARY VOLCANIC ROCKS OF THE LOS FRAILES FORMATION (BOLIVIA).

The Los Frailes Formation, a 9000 km<sup>2</sup> area of Miocene-Pliocene age, contains uranium mineralization in acid tuffs, ignimbrites and lavas. Uranium also occurs in sedimentary rocks of various types and ages which outcrop in adjacent areas. So far the most extensive mineralization seems to be confined in volcanic pyroclastic rocks. Although the surface mineralization varies in grade from 0.01% to more than 2.5%, the average grade in the only deposit being mined (Cotaje) is 0.05% of U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. On the basis of the available data it is believed that certain leaching processes, during the last erosion cycle (Pliocene-Pleistocene) and under very humid conditions, brought about the mobilization of the uranium from the volcanic rocks in aqueous alkaline and calco-alkaline solutions circulating on the surface and underground. Uranium minerals were deposited, generally by chemical reduction, in tectonic zones and/or zones of high porosity. The common metallogenetic model in the western area, defined as the 'Sevaruyo uraniferous district', is exogenic and is characterized by epigenetic uranium occurrences and deposits formed by supergene enrichment. On the basis of their mechanism of formation, control of mineralization and mineral associations, these deposits are classified according to: those with strictly tectonic control, those with sedimentary control and those of mixed genetics. Recent discoveries in the eastern area of the volcanic complex give evidence of epigenetic mineralization, apparently linked with hypogene hydrothermal processes, in addition to exogenic mineralizations contained in rocks stratigraphically subjacent to the Los Frailes Formation. There is no intention of making an evaluation of the recently discovered resources since the studies and exploration are still at too early a stage to warrant prediction of their real potential.

### MINERALIZACION DE URANIO EN ROCAS VOLCANICAS TERCIARIAS DE LA FORMACION LOS FRAILES, BOLIVIA.

La formación Los Frailes, una zona de 9000 km<sup>2</sup> de edad Mio-Plioceno, contiene mineralización de uranio en tobas, ignimbritas y lavas ácidas; el uranio se encuentra también en rocas sedimentarias, de diverso tipo y edad, aflorantes en áreas adyacentes. Hasta la fecha, la mineralización más importante parece estar confinada en las rocas volcánicas piroclásticas. Aunque las leyes de la mineralización en superficie varían desde un 0,01% hasta más de un 2,5%, la ley promedio en el único yacimiento en explotación (Cotaje) es del 0,05% de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. De acuerdo con los datos disponibles, se piensa que ciertos procesos de lixiviación, durante el último ciclo erosivo (Plioceno-Pleistoceno) y en condiciones de mucha humedad, produjeron la movilización del uranio de las rocas volcánicas en soluciones acuosas alcalinas y calcoalcalinas de circulación superficial y subterránea, depositando minerales de uranio

generalmente por reducción química en zonas tectonizadas y/o de porosidad extrema. El modelo metalogenético común en el área occidental, definido como "Distrito Uranífero Sevaruyo" es exógeno y se caracteriza por manifestaciones y yacimientos de uranio epigenéticos originados por enriquecimiento supergénico. Tomando en cuenta su mecánica de formación, controles de la mineralización y asociaciones minerales presentes, se clasifican en: yacimientos con control estrictamente tectónico, control sedimentario y de genética mixta. Recientes descubrimientos en el área oriental del complejo volcánico muestran mineralización epigenética, aparentemente vinculada a hidrotermalismo hipogeo, además de mineralizaciones exógenas contenidas en rocas estratigráficamente infrayacentes a la formación Los Frailes. No se intenta hacer una evaluación de los recursos recientemente descubiertos ya que su investigación y exploración son aún incipientes para predecir su real potencial.

## 1. INTRODUCCION

En 1970, el autor de este trabajo descubrió minerales de uranio en tobas e ignimbritas de la formación Los Frailes, de edad Mio-Plioceno, en el sur de Sevaruyo. El yacimiento principal y a la vez el primer descubrimiento, es Cotaje, el cual está en una de las muchas áreas comprendidas dentro de los 9000 km<sup>2</sup> explorados inicialmente por métodos de prospección terrestre y, recientemente, mediante prospección aérea.

Se pretende hacer aquí una descripción geológica, muy especialmente de la formación Los Frailes, en relación con la fuente y procesos de mineralización del uranio. La descripción de los diferentes yacimientos y manifestaciones uraníferas descubiertos durante los últimos ocho años y su interpretación genética proporcionan el modelo metalogenético que permite clasificarlos, de acuerdo con los controles geológicos de formación y mecánica de emplazamiento, en grupos característicos.

Adicionalmente, las conclusiones a las que se ha llegado en este trabajo dan una visión clara del potencial uranífero que es posible esperar, a medida que progresan las actividades de prospección y exploración en la unidad Los Frailes y en su área de influencia, por parte de la Comisión Boliviana de Energía Nuclear (COBOEN). Aunque el estado actual de las investigaciones revelen un conocimiento profundo de solamente los bordes occidental y oriental de la Formación Los Frailes, más que de su parte central.

Los primeros estudios que describen la geología del área son de Kozlowski (1923), mencionados por Ahlfeld [1], Pérez [2], Kriz et al. [3] y Evernden et al. [4], quienes en base a edades absolutas correlacionaron las formaciones cretácicas y terciarias del altiplano.

Los primeros trabajos de prospección fueron ejecutados por Sweedish [5], en los que se incluye radiometría y magnetometría aérea de la cordillera Los Frailes. COBOEN inició la aplicación de métodos de radiometría terrestre en el

área de Sevaruyo en 1969, investigando en sedimentitas de edad cretácica y terciaria con relativos resultados. En 1970 dirigió la búsqueda de minerales de uranio a rocas volcánicas de la formación Los Frailes, con resultados positivos que llevaron a la localización de los yacimientos Cotaje, Huancarani, Torko, Los Diques, Tholapalca III, etc., y de varias manifestaciones uraníferas, la mayoría actualmente en estudio.

Los primeros estudios del yacimiento Cotaje fueron efectuados por Parera [6] y Aparicio [7]. En 1977, Belluco [8] estudió además de Cotaje, las manifestaciones uraníferas del área Río Marquez. Finalmente, numerosos informes internos elaborados por geólogos de COBOEN, contribuyeron al conocimiento del ambiente geológico en el que se desarrolla la mineralización de uranio.

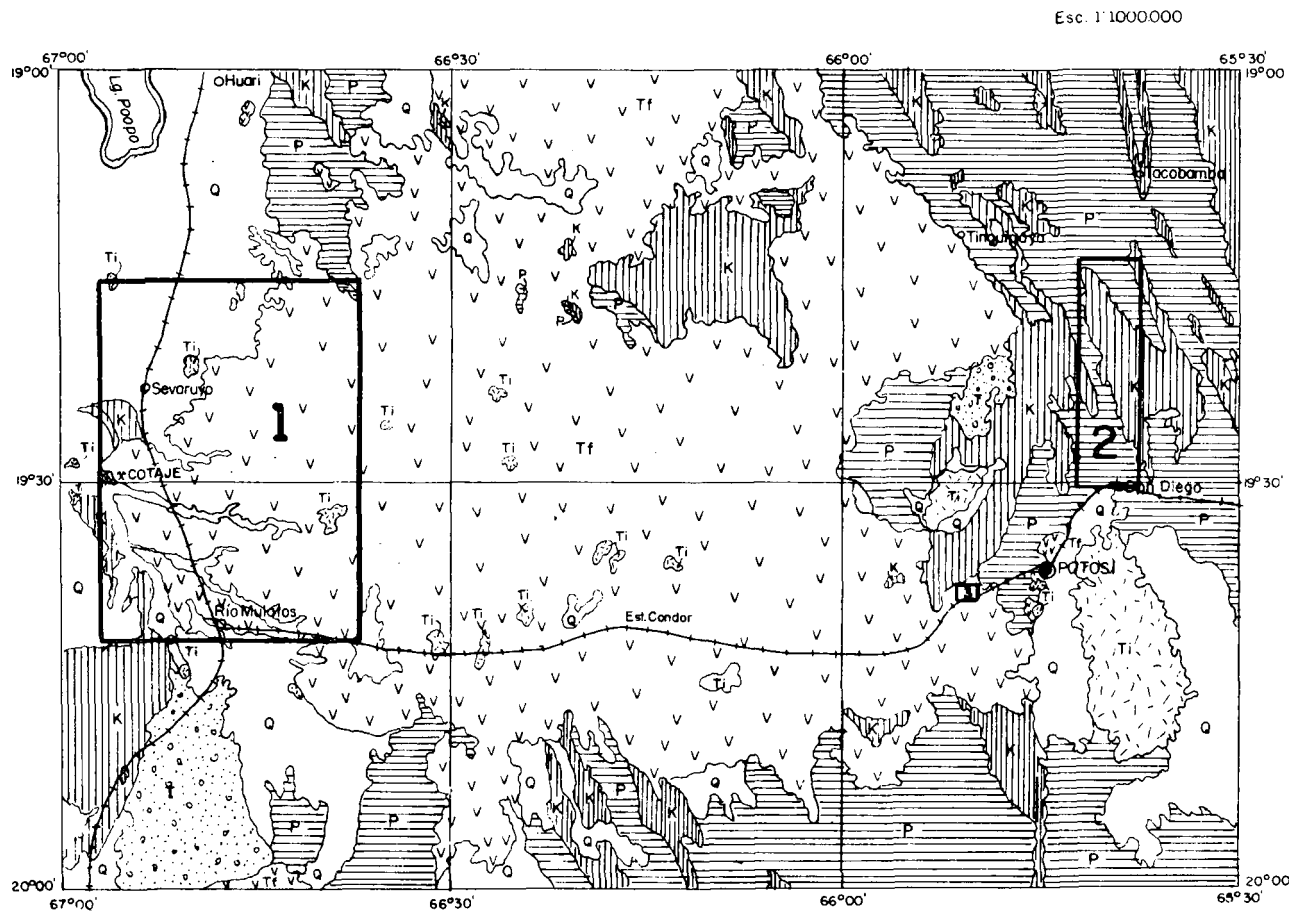
### 1.1. Ubicación

Las mineralizaciones de uranio se localizan en rocas volcánicas de la formación Los Frailes, de gran difusión (Fig.1) en el borde occidental de la Cordillera Oriental de Los Andes, entre 19° y 20° de latitud sur. Dentro de la mencionada formación volcánica y en su área de influencia se han definido el distrito uranífero Sevaruyo en el oeste y las áreas de prospección Yauricoya-Chulchucani y Tollojchi en el este.

## 2. GEOLOGIA GENERAL


Los afloramientos en el área que involucra el presente estudio están representados en un 80% por rocas de origen volcánico de composición riolítica, riodacítica y andesítica, constituídas por tobas, ignimbritas y lavas de la formación Los Frailes (Mio-Plioceno), depositadas en capas de leve buzamiento, hacía las zonas distales del este y oeste, a partir de conos de eyección parcialmente erodados, que constituyen el relieve topográfico más elevado (Fig.1). Los restantes afloramientos están constituídos por rocas sedimentarias de edad cretácica, terciaria y cuaternaria, de donde emergen pequeños diapiros, y por algunos stocks intrusivos ácidos.




Morfológicamente, el paisaje es típicamente volcánico, desarrollando formas de construcción con potentes depósitos piroclásticos (tobas, ignimbritas y conglomerados volcánicos), a los que se sobreponen coladas de lava que cubren el paleorrelieve. Todo el complejo volcánico disminuye en espesor y desciende a relieves bajos desde los conos volcánicos hasta la llanura altiplánica, poniéndose en contacto discordante con sedimentos paleozoicos, cretácicos y/o terciarios.



A. Aparicio F.

# R E F E R E N C I A S

-  CUATERNARIO (Q)  
Taludes, terrazas, Depósitos aluviales fluvio lacustre, lacustres (calizas orgánicas), eólicos y volcánicos.
-  TERCIARIO (T)  
Sedimentos continentales, conglomerados, areniscas y arcillas de color rojo-marrón.
-  Terciario volcánico (Tf)  
Form. Los Frailes (Tobas, ignimbritas y lavas ácidas.)
-  Rocas intrusivas en general (Ti)
-  CRETACICO (K)  
Sedimentos continentales y marinos (neríticos). Conglomerados y areniscas rojo vivo a amarillo, calizas gris amarillento y margas multicolores.
-  PALEOZOICO (P)  
Sedimentos marinos y continentales de edad Ordovisco, Silúrico, Devónico y Permo-Triásico (?)

-  Distrito Uranífero Sevaruyo
-  Area de prospección Yauricoya-Chullchucani
-  Area de prospección Tollojchi

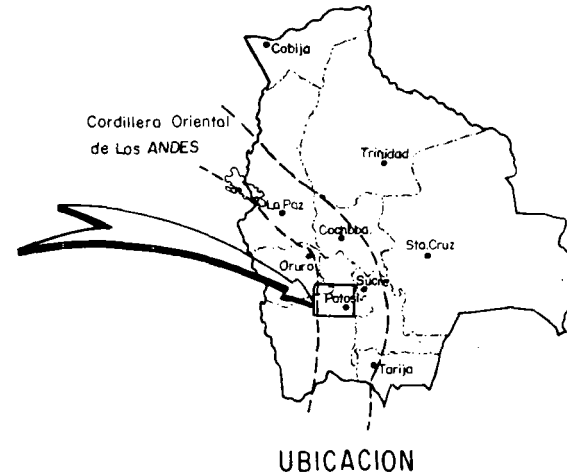


FIG.1. Mapa geológico y de ubicación de la formación Los Frailes.

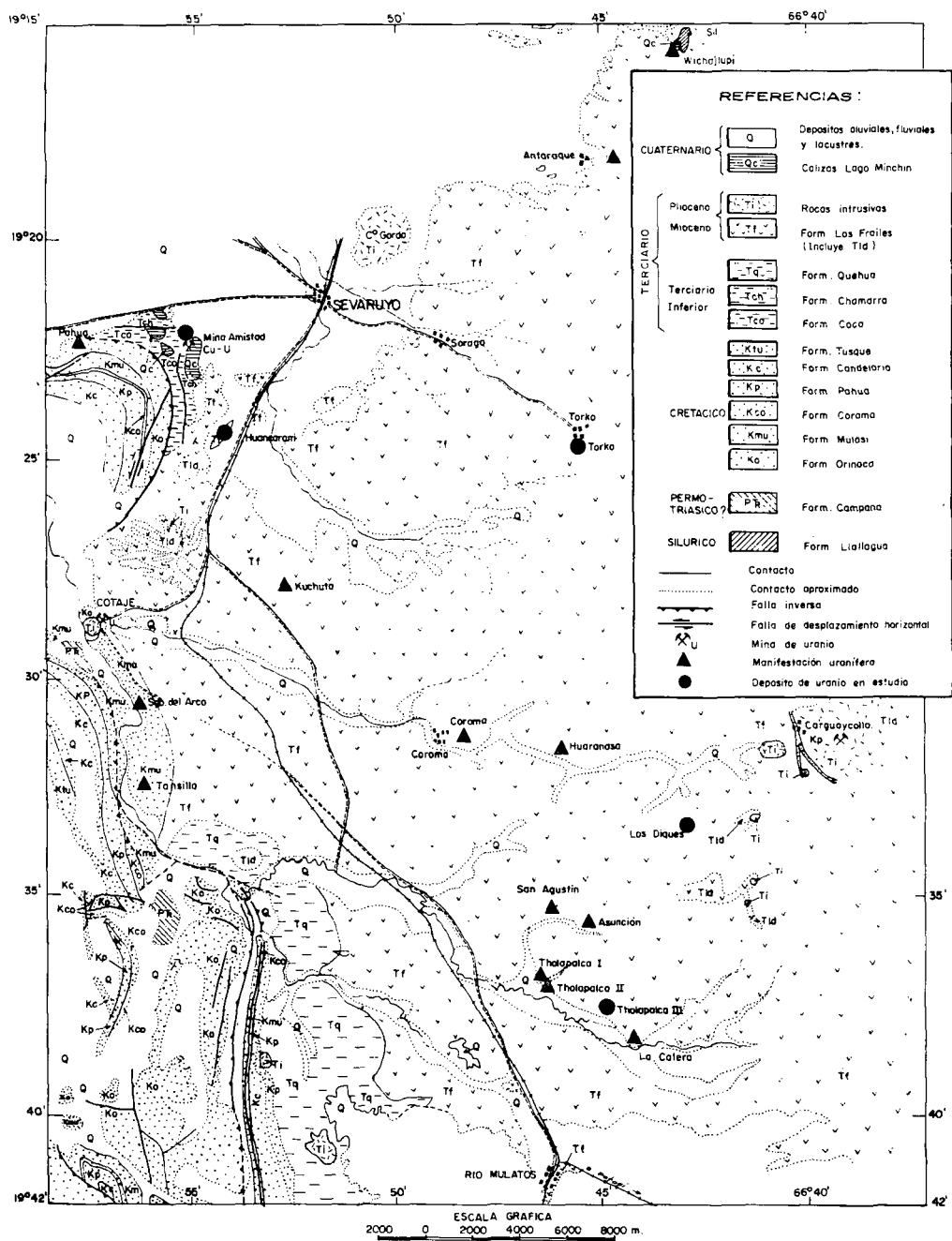
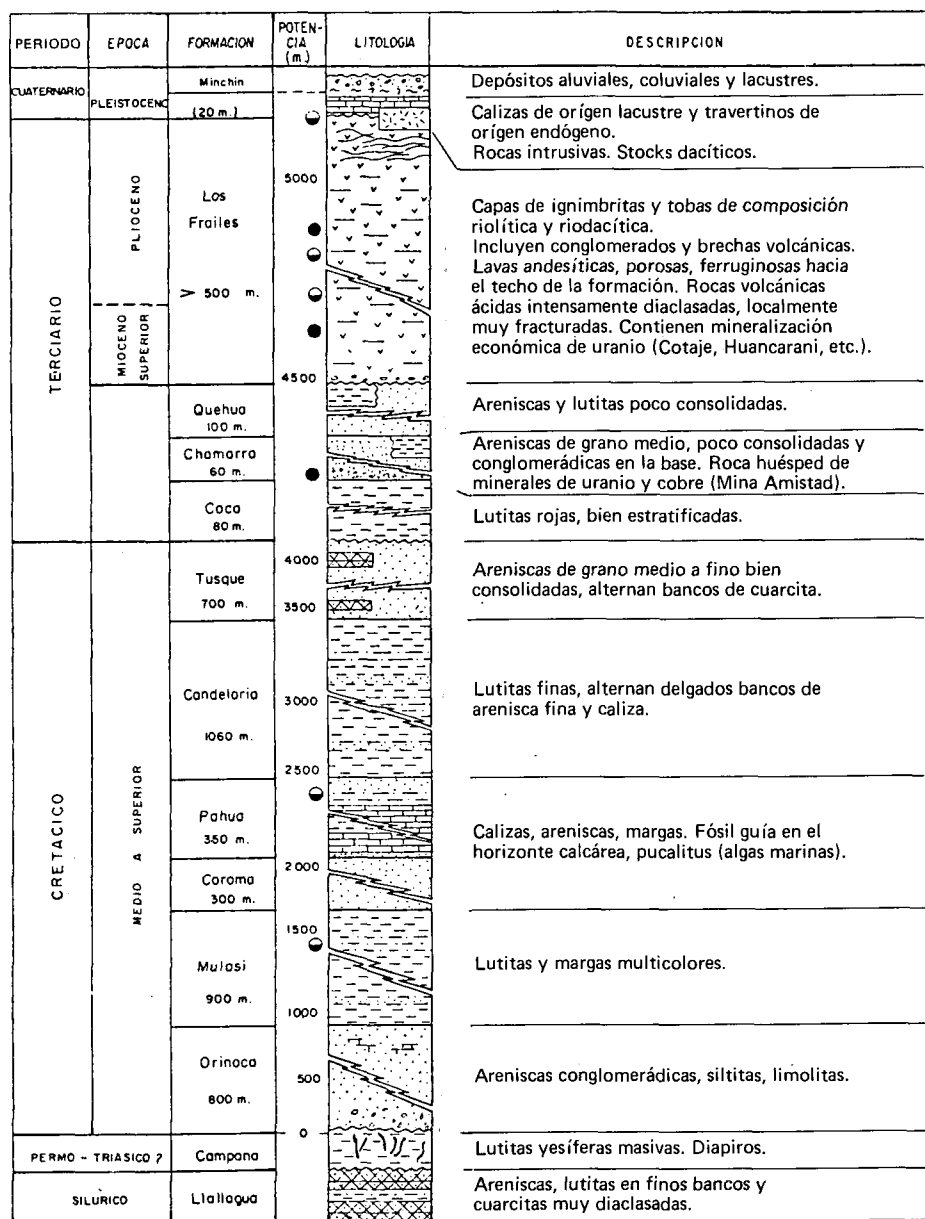


FIG.2. Mapa geológico del distrito uranífero Savaruyo, con localización de mineralizaciones de uranio.



● Nivel aproximado de manifestaciones de uranio.

● Nivel aproximado de depósitos de uranio

FIG.3. Columna estratigráfica generalizada del distrito uranífero Sevaruyo.

El sistema hidrográfico está controlado por tobas e ignimbritas, más suaves a la erosión que las lavas, y por líneas estructurales tectónicas a lo largo de las cuales la erosión fluvial ha formado profundos valles, mostrando en conjunto un diseño de drenaje dendrítico que varía a una distribución rectangular a medida que avanza hacia el altiplano.

Varias concentraciones de minerales de uranio se encuentran en toda el área, estando confinadas las de mayor interés económico, hasta la fecha, en tobas e ignimbritas de la formación Los Frailes (Fig.2). Otras concentraciones menores se ubican en rocas terciarias de la formación Chamarra. También se han localizado indicios menores en rocas cretácicas cercanas al contacto con el complejo volcánico Los Frailes. Recientemente se han encontrado importantes concentraciones en rocas paleozoicas, intensamente plegadas en el área oriental.

### 3. ESTRATIGRAFIA

Las características litoestratigráficas de las unidades sedimentarias y volcánicas diferenciadas en el distrito Sevaruyo, que constituye el área más estudiada, abarcan desde el Paleozoico hasta el Cuaternario (Fig.3) y se ordenan cronológicamente como sigue:

#### 3.1. Formación Llallagua

Esta unidad está representada por un pequeño afloramiento de cuarcitas y areniscas con intercalación de lutitas de edad silúrica, y ha sido denominada formación Llallagua [3]. Su importancia reside en el contacto discordante y muy irregular que muestra con el material piroclástico terciario de la formación Los Frailes, indicando de esta manera la presencia del basamento paleozoico a poca profundidad.

#### 3.2. Formación Campana

Asignada tentativamente como de edad permo-triásica. Es de origen evaporítico y emerge en diapiros a través de ejes de estructuras mayores del sistema cretácico. Litológicamente se compone de lutitas yesíferas de color rojo violáceo, sin estratificación, y contiene delgados y discontinuos banquitos de areniscas de grano fino y color marrón oscuro. El yeso es abundante en delgadas vetillas.

#### 3.3. Sistema cretácico

Está constituido por potentes capas de areniscas, lutitas, margas y calizas de típica coloración roja y marrón, en general de grano medio a fino. Se asume

que estos sedimentos se depositaron en ambiente transicional de borde de cuenca y marino, representado este último por las calizas de la formación Pahua de bastante desarrollo en el área (300 m de potencia). Esta formación calcárea fue correlacionada en base a su composición litológica y la presencia de restos fósiles con la formación El Molino del sinclinal de Miraflores [1].

Las formaciones: “Orinoca”, constituida por areniscas conglomerádicas, siltitas y limolitas; “Mulasi”, eminentemente compuesta de lutitas y margas multicolores; “Coroma”, compuesta de areniscas con intercalación de delgadas capas arcillosas; “Pahua”, de composición calcárea-arenosa; “Candelaria”, de composición lutítica con alternancia de bancos de arenisca fina y calizas y “Tusque”, compuesta de areniscas arcósicas de grano medio a fino y cuarcitas, forman parte de estrechas estructuras de plegamiento de ejes orientados preferentemente norte-sur que se levantan sobre la llanura altiplánica.

Las rocas sedimentarias cretácicas, con un espesor aproximado de 4500 m, suprayacen al basamento paleozoico en discordancia y, en igual forma, están en contacto discordante con rocas terciarias.

### 3.4. Sistema terciario

Lo representan sedimentos depositados en un ambiente típicamente continental, diferenciados en las formaciones Coca y Chamarra, y un complejo de material piroclástico consolidado y efusivo que constituye la formación Los Frailes.

#### 3.4.1. Formación Coca

La constituyen lutitas de color rojizo bien estratificadas, con intercalación de delgadas capas de arenisca de grano fino bien cementadas; alcanza un espesor máximo de 80 m y aflora en un área muy reducida.

#### 3.4.2. Formación Chamarra

Está formada de una sucesión de areniscas conglomerádicas de grano grueso a medio bien estratificadas, con bancos de 0,5 a 3 m bastante cementados, de colores amarillentos y grises con muestras de alteraciones en su coloración por efectos de circulación de soluciones. En la parte superior contiene delgados lentes lutíticos. Las condiciones litológicas de esta formación y el contenido de minerales de cobre singenético en forma de lentes concordantes en la parte sur del afloramiento, así como la presencia del yacimiento Mina Amistad de cobre-uranio, concordante con la estratigraficación, avalan su importancia dentro del contexto geológico del distrito Sevaruyo. Su espesor aproximado es de 50 m.

CUADRO I. CONSTITUYENTES COMUNES (% MODAL) DE LAS ROCAS VOLCANICAS DE LA FORMACION LOS FRAILES

Minerales constituyentes	% de Comp. total	Descripción
Matriz vítrea	45-65	Vidrio incoloro a veces pardo y sílice criptocristalina. Textura fluidal
Cuarzo	12-27	Fenocristales (3,3 mm) subhedrales, fragmentados y corroídos. Microcristales
Feldespatos de potasio	1-6	Generalmente sanidina, rara ortosa. Cristales subhedrales (1 mm) fracturados, maclas carlsbad y simple contacto
Plagioclasas	10-20	Fenocristales (3 mm) fracturados, diseminados en la matriz micro- cristalina, tipo sódico (andesina- oligoclasa). Baveno, albita y albita- carlsbad. Textura zonal
Litoclastos (Frag. líticos y volcánicos)	5-12	Fragmentos angulares de cuarcitas areniscas, pelitas y rocas volcánicas (xenolitos), silicificados. Pómez calapsada, a veces shards
Biotita	4-11	Fenocristales (3 mm) y microcristales. Titaníferas y ferríferas. Alterada a óxidos de hierro y clorita
Circón	0,1-0,4	Cristales euhedrales diseminados en la matriz e incluidos en cuarzo y/o biotita
Apatita	0-0,1	La mayoría incluida en biotitas
Magnetita	0-0,1	Muy diseminada
Hiperstena <sup>a</sup>	0-1	Generalmente en fenocristales (3 mm) fracturada y alterada (óxidos de hierro)

<sup>a</sup> Presente preferentemente en las capas de lava.

### 3.4.3. Formación Los Frailes

La unidad litoestratigráfica Los Frailes está constituida por diversas capas de tobas, ignimbritas, lavas incluyendo brechas y conglomerados volcánicos, de composición riolítica, riodacítica y andesítica.

Todo el complejo volcánico es de carácter eminentemente ácido. Su difusión a partir de conos volcánicos parcialmente erodados alcanza en su

totalidad 9000 km<sup>2</sup> aproximadamente. En el distrito Sevaruyo las capas tobáceas e ignimbríticas, con visibles diferencias morfológicas, están generalmente coronadas por capas de material efusivo lávico de composición andesítica. Las capas están dispuestas subhorizontalmente o con leve inclinación al oeste y en discordancia con sedimentos infrayacentes.

En el Cuadro I se especifican los minerales constituyentes comunes que muestran la composición litológica promedio de muestras de tobas, ignimbrita y lavas recolectadas casi todas en áreas de yacimientos y manifestaciones de uranio y a diferentes niveles. Los mayores constituyentes son: una matriz vítrea criptocristalina, fenocristales de cuarzo, plagioclasas y feldespatos de potasio. Los minerales máficos más importantes son: la biotita en su mayoría en proceso de alteración y también hiperstena en pequeños porcentajes. Como minerales accesorios están presentes circón, apatita y magnetita. El cuarzo y la biotita se encuentran también en microcristales. Dando un aspecto brechoso a la roca, están presentes en bastante abundancia litoclastos de cuarcitas, areniscas y pelitas, además de fragmentos de roca ígnea volcánica. Eventualmente se encuentra piedra pómez totalmente colapsada y shards en los miembros ignimbríticos.

En base a edades absolutas por el método potasio-argón, se determinaron 6,7 y 7,5 millones de años [4] para la formación Los Frailes. Recientemente, en el Instituto de Geocronología de la Argentina, se determinaron 3,6 millones de años en el techo de la formación (zona Carguaycollo) y 16 millones de años cerca de la base [9]. Consecuentemente, el episodio volcánico que dió origen a esta unidad se desarrolló desde el Mioceno Superior hasta el Plioceno Superior. Se constatan efectos póstumos de esta intensa actividad volcánica en las numerosas fuentes termales y emanaciones de H<sub>2</sub>S del distrito (Urmiri, Wichajlupi, La Calera, etc.).

Las rocas extrusivas de la formación Los Frailes son las que contienen la mineralización económica de uranio. Específicamente, las tobas brechosas e ignimbritas de esta unidad son las rocas huésped del yacimiento Cotaje.

A menudo se pueden observar estructuras de subsidencia por compactación y/o colapso tectónico formando pequeñas cuencas abiertas; Belluco [8] sugiere la formación de estas depresiones por reactivación de antiguas líneas de fallas por una tectónica reciente (cuaternaria); pero las observaciones de campo muestran que todas estas cuencas están actualmente abiertas y erodadas, habiendo tenido tiempo suficiente para desarrollar e integrar su drenaje a la red actual. Parece más verosímil pensar que estas áreas de subsidencia se formaron durante los últimos estadios del episodio volcánico explosivo que extruyó enormes volúmenes de material, seguido de movimientos locales [10] que generaron depresiones tectónicas para establecer el equilibrio local; adicionalmente, la existencia de niveles ignimbríticos muy porosos, que sufrieron un proceso de compactación por efecto de la enorme presión litostática supra-

yacente, y la lixiviación por aguas juveniles y/o vadasas que permitieron la disolución de sílice, la cual emergió durante la formación de las subsidencias por fracturas mayores, consolidándose como diques de roca completamente silicificada. Estos diques afloran hoy como bancos subverticales en la zona de las cuencas de subsidencia, como Tholapalca III y Los Diques.

Afloran en el área varios cuerpos intrusivos pequeños de composición dacítica que por su litología y tipo de emplazamiento son interpretados como stocks sub-volcánicos post-Los Frailes.

Se completa el cuadro geológico con depósitos cuaternarios de calizas de la formación Minchín y modernos depósitos aluviales, coluviales, lacustres y travertinos.

#### 4. TECTONICA Y BREVE HISTORIA GEOLOGICA

La región ha sido plegada y fallada por efecto del ciclo orogénico hercínico que afectó al basamento paleozoico, formando las cadenas hercínicas (dorsales) y cuencas intermontanas como las de Sevaruyo y Potosí. La erosión de estas cadenas convirtió la región en una meseta de poca altura y formó una potente capa de relleno de edad cretácica [1] compuesta de sedimentos clástico-calcareos de origen marino y/o costanero.

Sin indicios de edad relativa, un diastrofismo post-cretácico y pre-oligoceno ocasionó un suave plegamiento del sistema Cretácico. Durante el mismo ciclo o en uno posterior, se produjo un fuerte fallamiento que probablemente se trata del primer plegamiento andino. Las estructuras producidas tienen una dirección fundamental N-S, visibles en grandes sectores libres de la cubierta volcánica Los Frailes, y han permitido la conservación de franjas del Cretácico plegado, generalmente en sinclinales, del ciclo erosivo post-orogénico. Nuevamente se produce la deposición de sedimentos clásticos en ambiente continental (formaciones Coca y Chamarra en el distrito Sevaruyo) de difusión local. Un ciclo diastrófico posterior, aproximadamente durante el Mioceno temprano, produce la dislocación de las rocas terciarias y reactiva las antiguas líneas de fractura, formando ya el esquema del Bloque Andino y la Cuenca Altiplánica.

El conjunto sedimentario de edad paleozoica, cretácica y terciaria sufrió un ciclo erosivo que formó la depresión que se extiende por debajo de la cubierta Los Frailes, la cual se acumuló durante el ciclo volcánico Mioceno Superior-Plioceno.

Finalmente, una tectónica post-pliocena, asociada a la emersión de apófisis (stocks sub-volcánicos) de cuerpos intrusivos mayores produjo nuevos e importantes efectos de fallamiento o la removilización de antiguas líneas de fallas; como resultado de ésta se observa actualmente un leve abovedamiento (E.J. Rodriguez, comunicación personal) del complejo volcánico Los Frailes.

Durante este diastrofismo se formaron dos sistemas de fallas tipo cizallamiento, típicos de una mecánica compresiva de dirección E-W. El más antiguo, de dirección NW-SE y probablemente producto de una reactivación de las fallas de ciclos anteriores, es interpretado por los alineamientos que en su mayoría son aprovechados por los cauces de los ríos Sevaruyo, Marquez, Coroma, etc. El segundo, probablemente más moderado, rumbo NE-SW, se delinea claramente sobre el complejo volcánico Los Frailes en forma de fallas y fracturas en muchos casos, e intercepta y desplaza al sistema anterior.

## 5. YACIMIENTOS DE URANIO

### 5.1. Características generales de los yacimientos

Se encuentran minerales de uranio conteniendo más del 0,03 % de  $U_3O_8$  en tobas e ignimbritas brechosas de la formación Los Frailes en el distrito Sevaruyo. Todavía no se han muestreado ni estudiado todas estas manifestaciones minerales, pero se ha identificado y comprobado la existencia de minerales de uranio.

Las concentraciones minerales de uranio que por su mayor grado de investigación y sus parámetros físicos presentan características económicas, al presente, se catalogan como "yacimientos de uranio". Las concentraciones con poca investigación desarrollada, cuyos parámetros físicos superficiales son considerados menores y con escasos datos sobre su importancia económica, se catalogan en el presente trabajo como "manifestaciones de uranio". La localización de ambos tipos de concentración y su identificación se encuentran en la Fig.1. En el distrito uranífero Sevaruyo se consideran yacimientos: Cotaje, Huancarani, Mina Amistad, Tholapalca III, Los Diques y Torko.

Los yacimientos de uranio más ricos son los que se manifiestan en tobas e ignimbritas porosas, brechosas, fracturadas y caolinitizadas de la formación Los Frailes. Uno sólo aparece en areniscas porosas terciarias, en la formación Chamarra.

Los minerales de uranio presentes son de dos tipos. Uno de coloraciones amarillas y verdes, correspondientes a minerales secundarios de uranio, como autunita y torbernita principalmente. El segundo tipo es de colores negros correspondientes a pechblenda y cofinita. Ambos tipos pueden encontrarse en el mismo yacimiento.

El tamaño de los yacimientos conocidos, en general pequeños, varía considerablemente. La persistencia de la mineralización de uranio en profundidad se extiende generalmente desde la superficie hasta 30 m; sus dimensiones en superficie varían desde 10 hasta 60 m de largo, existiendo casos de mineralización conspicua distribuida a lo largo de 1500 m. Las potencias varían entre 0,10 y 10 m de ancho.

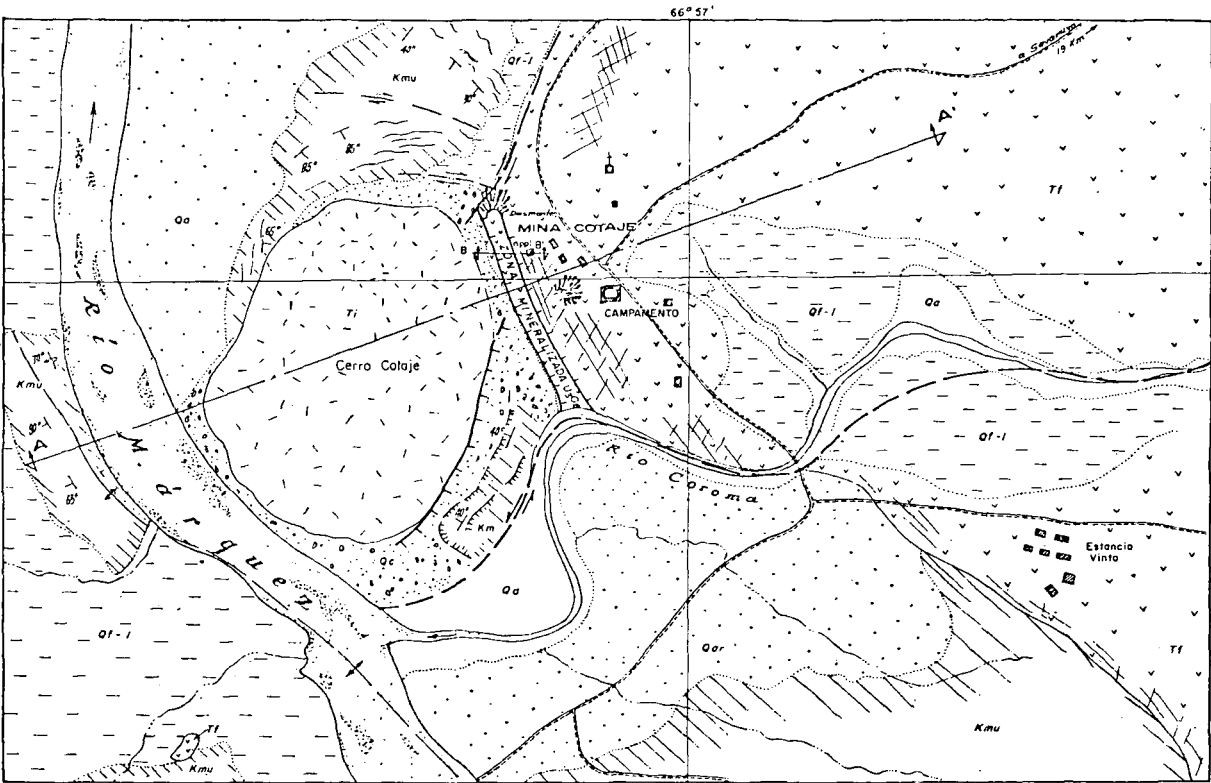


FIG.4. Mapa geológico de la zona de Cotaje.

El mineral más rico, pero muy localizado, dió un tenor químico de 2,5% y 1,2% de uranio equivalente (muestra de Cotaje).

La posición estratigráfica aproximada de los yacimientos y manifestaciones de uranio se muestra en la Fig.3.

## 5.2. Descripción de los yacimientos

Se describe cada yacimiento individualmente para mostrar sus características locales. Además, se incluye en cada caso la descripción de las manifestaciones de uranio con características similares y/o comunes a las del yacimiento principal.

### 5.2.1. Yacimiento Cotaje

Se encuentra entre la Estancia Cotaje y el Cerro homónimo, en el borde occidental de la formación Los Frailes (Figs 3, 4). La mineralización está en una zona de fallas subverticales de dirección N-S y vinculada a fuerte fracturación, trituración y marcada decoloración de tobas brechosas e ignimbritas de composición riódacítica.

La zona mineralizada está en tobas adyacentes al contacto tectónico con sedimentos lutíticos cretácicos, los cuales están intruidos por el stock dacítico que forma el Cerro Cotaje. La mineralización en superficie aflora sobre 350 m de longitud con espesores variables entre 1 y 10 m y constituye el único yacimiento actualmente en explotación dentro del distrito uranífero Sevaruyo.

La mineralización está controlada por un complejo sistema de fallas y fracturas (Fig.5). Un sistema menor de fallas oblicuas corta el esquema tectónico en el sector norte. Los minerales de uranio y asociados están contenidos preferentemente en las fracturas, formando desordenados sistemas de vetillas de mayor desarrollo en las fracturas abiertas. La porosidad de la roca huésped permite también la penetración de la mineralización en la roca misma a partir de las fracturas. En zonas de intensa milonitización, la mineralización se encuentra además dispersa en toda la masa de la roca, generalmente oxidada.

Las rocas de caja están constituídas por tobas brechosas (brecha volcánica) riódacítica con facies ignimbríticas hacia la base, sin delimitación definida. Es remarcable que la mineralización y los controles tectónicos afecten a ambos tipos litológicos indistintamente. En roca fresca es visible que los primeros componentes alterados por procesos exógenos son los feldespatos, aun si éstos están en los fragmentos volcánicos (xenolitos), lo que constituye un importante factor de mineralización especialmente si se asocia con el tectonismo, produciéndose intensa caolinitización y milonitización que dan una coloración blanco-amarillenta al conjunto.

Los minerales secundarios de uranio presentes son del grupo de los fosfatos de uranio: autunita, meta-autunita, torbernita y cuprosklodowskita, todos

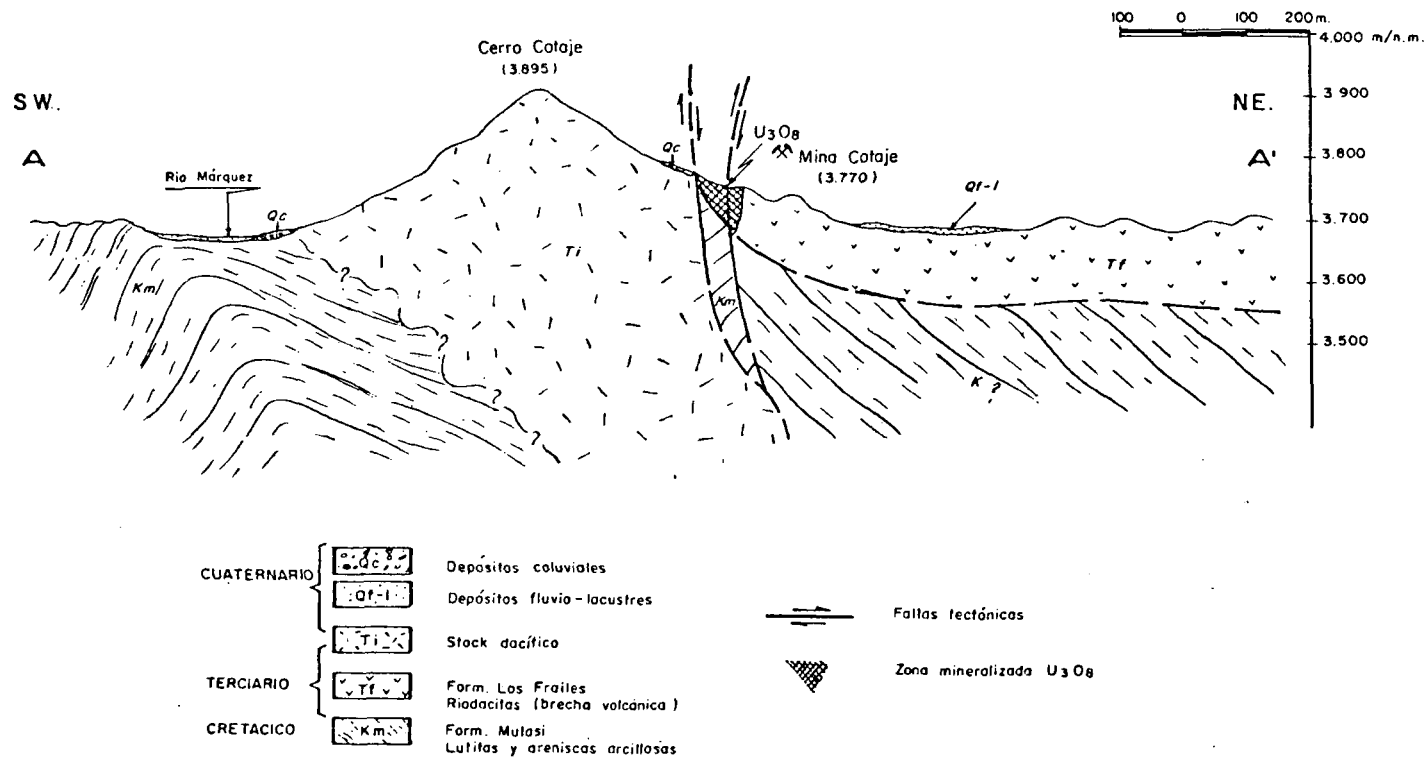
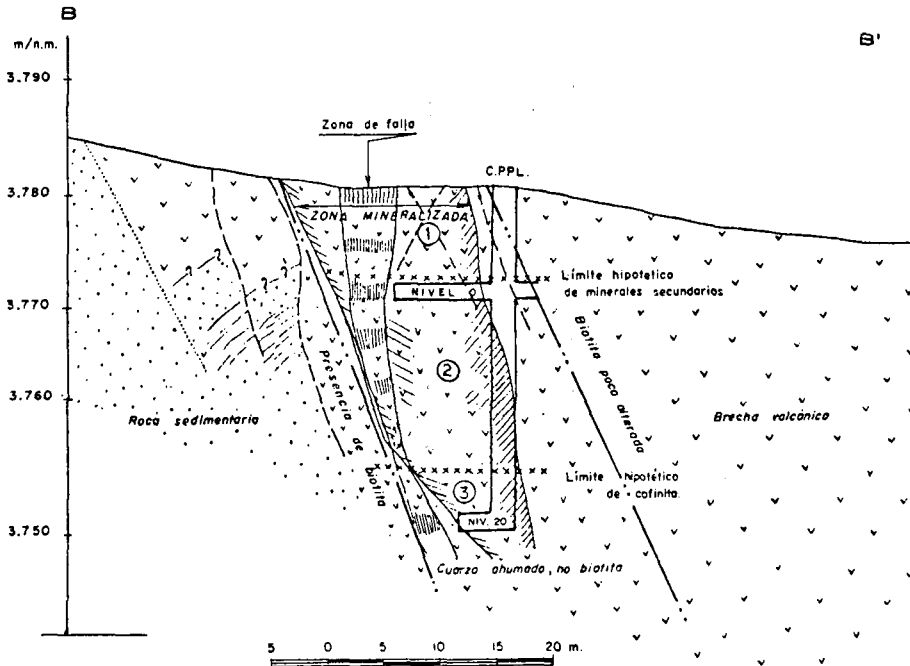


FIG.5. Sección transversal, con emplazamiento del yacimiento Cotaaje.



#### REFERENCIAS :




- ① Zona de minerales secundarios, autunita-torbernita
- ② Zona de cofinita (min. secundarios diseminados)
- ③ Zona de cofinita y pechblenda
- Límite hipotético que indica presencia de cuarzo ahumado y ausencia de biotita
-  Cuerpo mineralizado,  $> 0.05\%$   $U_3O_8$
-  Zona fuertemente fracturada, brechada y milonitizada
- Fracturas menores
- ..... Contacto litológico
-  C.P.P.L.
- Cuadro principal

FIG.6. Sección transversal del cuerpo mineralizado del yacimiento Cotaje.

ellos en cristales aislados, agrupados y microcristalinos. La cofinita, por sus propiedades ópticas, fue calificada como mineral reciente [11]; la pechblenda se encuentra en forma de pátinas.

La distribución de las especies minerales de uranio y minerales asociados responde más o menos al siguiente zoneamiento (Fig.6): minerales secundarios de uranio autunita-torbernita (mayoritarios) que, asociados a cristales interdigitados de yeso y siderita, están presentes en la parte superior del cuerpo mineralizado hasta una profundidad promedio de 8 m, a partir de la cual sólo se encuentra cofinita, asociada con baritina y yeso, hasta más o menos 30 m de profundidad promedio. A partir de esta zona, las labores mineras mostraron indistintamente la presencia de cofinita (mayoritaria) y pechblenda asociadas con ganga de baritina y cantidades muy pequeñas de marcasita, pirita, blenda, galena y melnicovita.

En igual forma, en las zonas de alta radiactividad es mayor la alteración de las biotitas a óxidos de hierro, observándose la ausencia de biotita en zonas de mineralización más intensa. Los estudios metalogenéticos de una muestra de profundidad (entre 20 y 30 m) realizados por Gangloff [11] dieron como resultado la siguiente sucesión paragenética:

Pirita	_____
Marcasita	_____
Melnicovita	_____
Barinita	_____
Blenda	_____
Galena	_____
Cofinita	_____

Los estudios adicionales efectuados por Branche [12] revelaron la existencia de pechblenda (uraninita botroidal) en finas pátinas junto a cofinita, en muestras de profundidad ( $\pm 30$  m).

Los análisis químicos y radiométricos de cuatro muestras indican un fuerte desequilibrio radiactivo y las leyes de uranio van disminuyendo en profundidad; las leyes más elevadas se encuentran en el mineral secundario.

La presencia de pechblenda, barinita y sulfuros sirvió de base para sugerir una génesis endógena epitermal de los minerales de uranio del yacimiento Cotaje [13, 14]. Pero la pechblenda está presente en cantidades muy pequeñas como pátinas y, por tanto, parece pertenecer a la última generación, es decir, se trata de pechblenda formada por procesos secundarios (supergénicos), ya que es muy frecuente el paso de  $U^{4+}$  a  $U^{6+}$  y viceversa en procesos superficiales [15]. La barinita, según los análisis efectuados, podría ser de origen volcánico [12].

Observando el control tectónico y litológico del yacimiento, la morfología del cuerpo mineralizado — cuyas dimensiones se reducen en profundidad, la ausencia de cuarzo hidrotermal y la asociación mineral presente, su zoneamiento y su relación con la caolinización y oxidación de la roca huésped, se puede interpretar el yacimiento Cotaje como de “génesis supergénica” de minerales de uranio concentrados como consecuencia de un proceso de sobresaturación de soluciones exógenas, alcalinas en tobas e ignimbritas, con un bajo índice de percolación y elevada evaporación ambiental.

Los minerales se depositaron en zonas de intensa fracturación y diaclasamiento. Las soluciones habrían lixiviado el uranio lábil de las rocas volcánicas que constituyen la formación Los Frailes, en condiciones de mucha humedad.

El proceso de extracción del ión uranilo de las rocas volcánicas debió iniciarse y alcanzar gran intensidad después de la conclusión del ciclo volcánico, es decir, desde fines del Plioceno y durante el Pleistoceno, por las condiciones de mucha humedad existentes durante la formación de las calizas cuaternarias de Lago Minchin. El proceso de lixiviación puede trabajar tanto en superficie, por la acción química de aguas superficiales, como en profundidad, por la circulación de aguas subterráneas.

La existencia del stock sub-volcánico que forma el cerro Cotaje de edad post-Los Frailes proporciona el factor tectónico para la formación de la zona fallada y fracturada. Aunque las dacitas no muestran ningún indicio de actividad hidrotermal, no se descarta la posibilidad de la ascensión de soluciones hidrotermales posteriores a la consolidación del stock, las cuales pudieron aportar la mineralización de los sulfuros que se asocian con los minerales de uranio, o que éstos pudieran provenir de soluciones producto de aguas vadasas que alcanzaron cierta profundidad y elevación de temperatura, poniendo en solución minerales correspondientes a fases hidrotermales anteriores.

### 5.2.2. Yacimiento Huancarani

La mineralización de uranio-manganeso se presenta rellenando diaclasas e impregnando brechas tectónicas en espesores desde 5 a 10 cm hasta 5 a 6 m. La mineralización está distribuida en forma discontinua sobre líneas de fracturación paralelas entre sí que afloran sobre un desarrollo longitudinal superior a los 1500 m y un ancho promedio de 100 m.

El control de la mineralización de este yacimiento está regido por fallas y la porosidad de las brechas, de dirección general NE-SW, con buzamientos que varían entre 45° y 70°E y un sistema de diaclasas, diagonal al interior, que afecta a tobas e ignimbritas riódacíticas de la formación Los Frailes (Fig.7). Según Belluco [8], la línea de fracturación podría corresponder a la misma falla regional que se presenta en Cotaje.

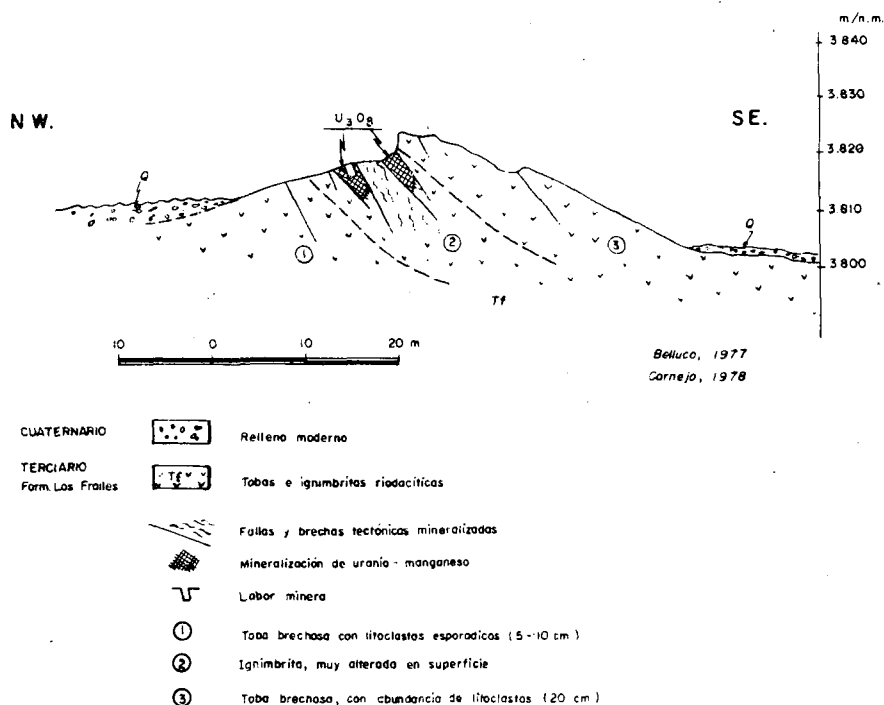


FIG.7. Sección transversal esquemática del yacimiento Huancarani.

De acuerdo con la investigación actualmente en progreso, se considera que la mineralización es superficial. El mineral presente de color negro (óxido complejo de manganeso y hierro) que rellena las fracturas abiertas, ocasionalmente radiactivo, parece haberse formado antes que los minerales de uranio (Rodríguez, 1978, comunicación personal); éstos consisten en autunita, con el mismo hábito y emplazamiento que los minerales de Cotaje, y su tenor máximo es del 1,3% de  $U_3O_8$  en la zona más rica. La roca huésped presenta abundantes cristales de cuarzo ahumado e intensa oxidación (limonita) en las zonas de mayor fracturación y brechamiento.

### 5.2.3. Yacimiento Torko

Es un yacimiento de minerales de uranio ubicado en niveles de tobas y lavas más altos que Cotaje y Huancarani. El control de la mineralización lo dan estructuras sub-verticales de fallamiento, ligeramente brechosas pero bastante milonitizadas, de dirección E-W, en la formación Los Frailes.

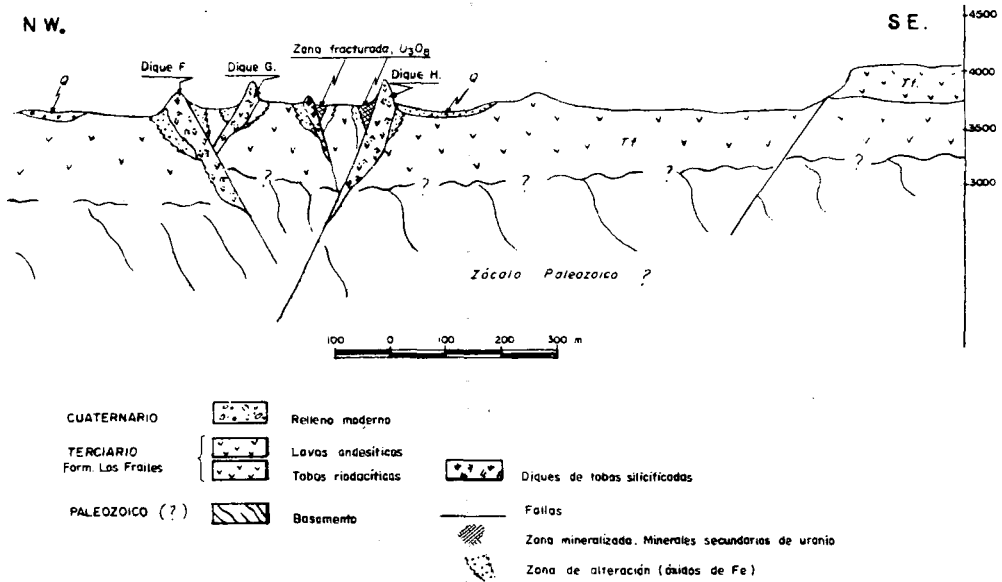


FIG.8. Sección transversal esquemática del yacimiento Los Diques.

Las estructuras tectónicas muestran seis alineamientos sub-paralelos de brechas y planos de fallas mineralizadas en forma irregular y con hábitos lenticulares en una longitud de 600 m. Los espesores mineralizados varían desde algunos centímetros hasta un máximo de 2 m.

Datos de superficie muestran la presencia de autunita y torbernita en cristales aislados y agrupados. Muestras de las zonas con mayor concentración de minerales dieron hasta un 0,4% de  $U_3O_8$ .

La roca de caja es una lava porosa de composición andesítica, infrayacente a una capa de tobas riolacíticas prácticamente erodada en el área mineralizada.

De acuerdo con el control estructural y el tipo de mineralización de los yacimientos Huancarani y Torko, en el estado actual de la investigación, se asume que ambos tienen genética común en edad, mecánica y procesos de formación con el yacimiento Cotaje; en este último caso con la variante del factor visible que ocasionó el tectonismo, el stock dacítico.

En igual forma, las manifestaciones de uranio "Kuchuta, Huaranasa, San Agustín, Tholapalca II y Antaraque" (Cornejo, 1977, comunicación personal), cuyos parámetros físicos son reducidos, se asimilan al grupo anterior, dadas las características de emplazamiento de la mineralización; en algunos casos ésta no es visible pero acusa anomalías radiométricas correspondientes a minerales de uranio. El único caso en el que se ve la presencia de pechblenda asociada con sílice microcristalina en fracturas se sitúa en la manifestación San Agustín.

#### 5.2.4. *Yacimiento Los Diques*

En una extensa depresión erosiva, que posiblemente se trate a la vez de una cuenca de subsidencia, afloran siete crestones silicificados de expresión topográfica y morfológica de diques, con espesores variables de 0,5 a 4 m. Estos diques ocupan fallas paralelas de dirección NE-SW y posición vertical, y afectan a una toba riódacítica de la formación Los Frailes (Fig.8).

La mineralización de uranio, representada por minerales secundarios (autunita y torbernita), aparece asociada a la presencia de ópalo (Belluco, 1975) y fuertes oxidaciones de hierro; su distribución es totalmente irregular, disponiéndose a veces en el cuerpo mismo de los crestones y/o en sus salbandas.

El dique más importante es el denominado "Dique H", que desarrolla una brecha tectónica continua en la que contiene minerales secundarios de uranio en un ancho de hasta 3 m. Se asume que este cuerpo mineralizado podría tener un desarrollo longitudinal superior a los 50 m.

Se atribuye la formación de los diques a una fuerte silicificación por soluciones hidrotermales. La formación de óxidos de hierro, de limitada penetración en profundidad, está ligada probablemente a la deposición de los minerales de uranio.

Los yacimientos Los Diques muestran control tectónico de la mineralización de uranio. Por otro lado, perforaciones de poco alcance indican la disminución de esta mineralización a profundidades superiores a los 10 m. Por tanto, nuevamente se piensa que estamos frente a un proceso exógeno de formación de los minerales de uranio.

#### 5.2.5. *Yacimiento Tholapalca III*

Se encuentra en este yacimiento una mineralización secundaria de uranio, distribuida en cuerpos con morfología de costras de espesores y concentración irregulares, que se presenta en el fondo de una cuenca de subsidencia, la cual afecta a tobas e ignimbritas riódacíticas de la formación Los Frailes. Los afloramientos son discontinuos en una planicie de 0,3 km<sup>2</sup>, donde se encuentran diseminados los minerales autunita, torbernita, boltwoodita y uranofano beta [16].

La cuenca de subsidencia está sobre tobas masivas y fracturadas, donde se ubican algunos pequeños crestones silicificados de posible origen hidrotermal que aparentemente no tienen relación con la mineralización de uranio. Suprayaciendo a la toba se encuentra una capa de ignimbritas muy erosionada en la zona mineralizada, que se caracteriza por la alteración casi total de su matriz vítrea y de los feldepatos durante el tiempo de inundación de la cuenca, lo que dió por resultado areniscas volcánicas muy friables [8]. Esta cuenca está actualmente abierta y conectada al sistema de drenaje del altiplano.

Las areniscas, principalmente la toba del substrato alterada a caolín y montmorillonita, constituyen en parte la roca huésped de la mineralización de uranio, de tipo impregnación con un espesor promedio de 2 m y una mineralización incipiente distribuida hasta 26 m de profundidad, de acuerdo con los trabajos de perforación. Muestras representativas de la parte superficial mostraron tenores químicos máximos de 0,9% de  $U_3O_8$ .

La ausencia de paleocanales y los cristales de cuarzo de formas euhedrales sugieren la alteración de las tobas e ignimbritas y, consecuentemente, la formación de las areniscas volcánicas, sin transporte alguno, en un ambiente lagunar de poca profundidad durante la vigencia de la cuenca de subsidencia. Las aguas contenidas en la cuenca, recolectadas por vía superficial y subterránea, fueron las que lixiviaron el uranio de las rocas volcánicas de la formación Los Frailes, formando soluciones acuosas alcalinas, a partir de las cuales se precipitaron los minerales de uranio por sobresaturación y reducción química. La posterior apertura de la cuenca ocasionó su desagüe y, después, la erosión del material del fondo; esta es la razón por la cual es bastante pobre la conservación del yacimiento Tholapalca III.

Se piensa que la manifestación "Tholapalca I" es un relicto de la misma cuenca de subsidencia, muy pobremente conservado.

Se considera que la manifestación "Asunción" responde probablemente a la misma genética y que, de acuerdo con los datos muy generales de que se dispone hasta el presente, se trata de la marca marginal de una pequeña cuenca cuya base está erosionada.

La manifestación "Coroma", asimilada a este mismo grupo, está controlada por una estructura sedimentaria de paleocanal elaborado sobre toba de base de una cuenca de subsidencia. La radiactividad correspondiente a minerales de uranio no identificados es del orden de 1000 c/s y se concentra en areniscas conglomerádicas y delgadas capas de materia orgánica de formación muy moderna. Existen indicios de que este cauce fue recientemente abandonado al alcanzar el río Coroma un período de madurez.

Finalmente, cabe mencionar que las manifestaciones de uranio "Pahua, Santiago del Arco y Tansilla", cuyo interés queda encuadrado en el ámbito puramente geológico, están ubicadas en sedimentos limolíticos y margas del Cretácico. Su importancia se debe a su localización cercana al contacto de rocas volcánicas, de donde provendrían iones uranilo en solución depositados en este ambiente geológico.

#### 5.2.6. Yacimiento Mina Amistad

La mina es un antiguo yacimiento de tipo bancos rojos (red beds), de donde se explotaba cobre. Los minerales de uranio aparecen parcialmente asociados

con carbonatos de cobre, óxidos de manganeso y hierro, y su yacencia se corresponde con tres niveles peneconcordantes a la estratificación de bancos de areniscas continentales muy porosas, con rumbo N-S y  $30^{\circ}$ – $40^{\circ}$  E de buzamiento, de la formación Chamarra (Terciario).

El principal cuerpo mineralizado de uranio, no delimitado aún, se localiza en un sector de aproximadamente 100 m, dentro de una mineralización de cobre que se extiende a su vez por varios centenares de metros. Los minerales de uranio presentes son torbernita y autunita, asociados con carbonatos de cobre (malaquita, azurita) y sulfuros (pirita, pirrotina, bornita) y acompañados de abundante óxido de hierro (limonita), manganeso (pirolusita) y calcita-aragonita. Los análisis químicos mostraron una ley media de 0,23% de  $U_3O_8$ .

Las ideas sobre la génesis de este yacimiento se basan en la asociación mineral y las condiciones litológicas de la roca huésped. La precipitación parece haberse producido por la mezcla de soluciones ascendentes sulfurosas provenientes de aguas juveniles o vadosas fuertemente cargadas de iones diversos, como Fe, Cu, etc., con cierta temperatura y soluciones bicarbonatadas provenientes de la alteración de rocas volcánicas de la formación Los Frailes y de las calizas cuaternarias Minchín que suprayacen a la formación Chamarra. Esta mezcla produce un violento cambio de pH y eH precipitando minerales a poca profundidad o en superficie. El proceso es favorecido por la extrema porosidad de ciertas zonas de la arenisca.

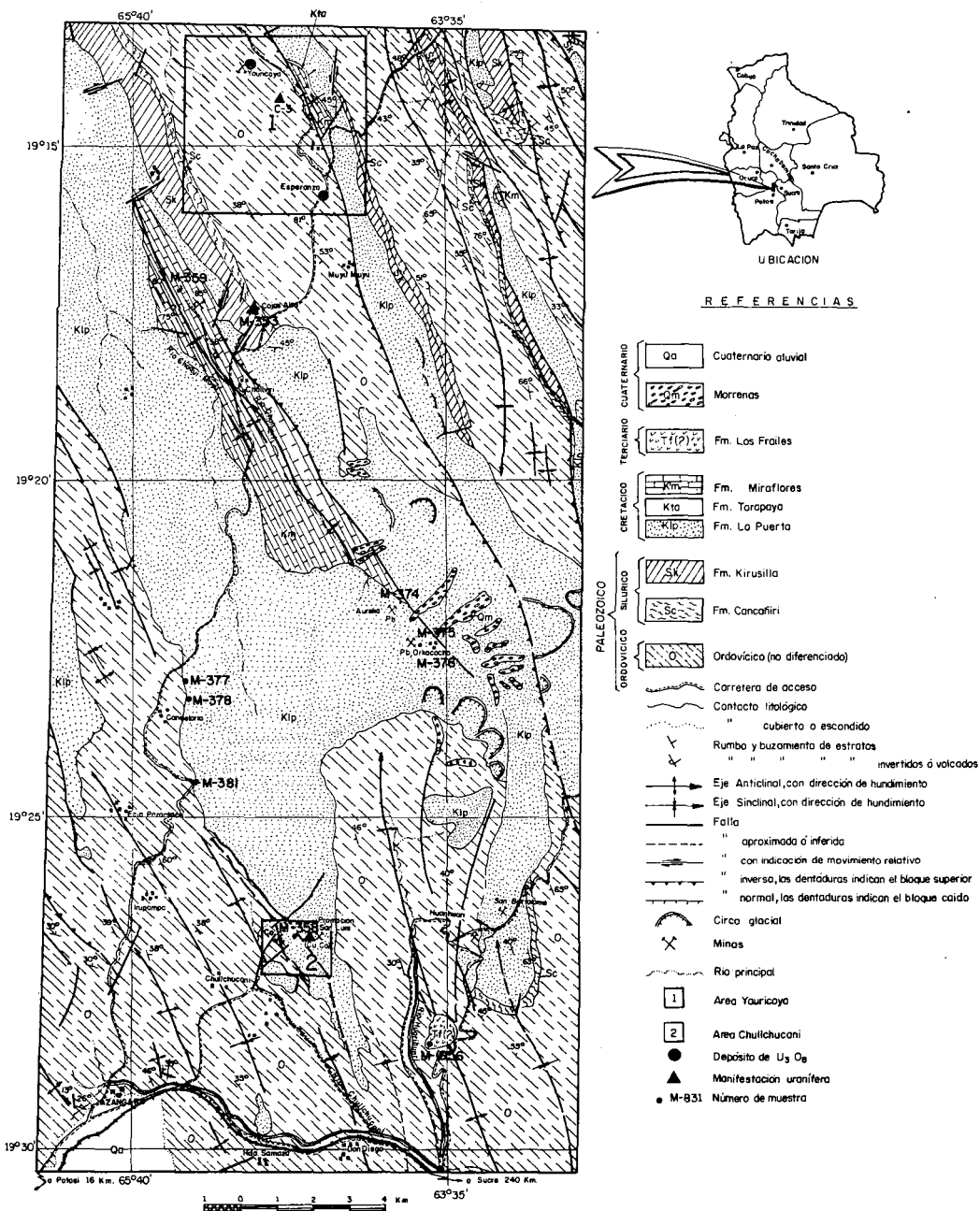
Según Rodríguez (1978, comunicación personal), en el caso específico de Mina Amistad, las soluciones ascendentes habrían atravesado la mineralización singénica de cobre contenida en rocas terciarias, produciendo su lixiviación y arrastre. Luego, el cobre y el uranio habrían precipitado juntos en niveles superficiales. A poca distancia al sur, en la formación Chamarra, afloran lentes concordantes de minerales de cobre sin uranio.

En igual forma, en manifestaciones de uranio satélites de Mina Amistad se aprecia la coincidencia de anomalías radiométricas con zonas de carbonatación descendente generalmente asociadas con fallas.

Pertenecen a este grupo las manifestaciones uraníferas La Calera y Wichajlupi.

La manifestación La Calera comprende los minerales de uranio, autunita y cofinita, acompañados de pirita, pirrotina y estibina. La mineralización en general está asociada a manantiales surgentes de aguas calcáreas con desprendimiento de  $H_2S$ . Los parámetros físicos no son aún conocidos. Belluco [8] y Rodríguez (comunicación personal) establecieron una posible relación de la estructura dómica con efectos diapíricos del sustrato; ello habría provocado el levantamiento de las tobas de la formación Los Frailes y del nivel calcareo de la formación Minchín.

Las aguas termales, frías en los puntos de surgencia y posiblemente vadosas, aprovecharían la fracturación de las rocas aflorantes para lograr su surgencia y



deposición de minerales al neutralizar el pH ácido de las soluciones en ambiente carbonático.

La manifestación Wichajlupi está vinculada igualmente a manantiales de aguas termales sulfurosas, en este caso de elevada temperatura, que depositaron travertinos de varios metros de espesor en tobas de la formación Los Frailes. Los valores radiométricos, debidos a la presencia de uranio, están irregularmente distribuidos en el travertino con precipitación de óxidos de hierro.

### 5.3. Area Yauricoya-Chullchucani

En la zona ubicada al NE de la ciudad de Potosí afloran predominantemente rocas del Paleozoico muy plegado y fracturado, en contacto discordante con formaciones sedimentarias del Cretácico (Fig.9).

Se han localizado concentraciones de uranio en cuarcitas, areniscas cuarzosas y siltitas de origen marino del Ordovícico medio a superior, caracterizado por una secuencia de potentes bancos de cuarcita, areniscas cuarzosas de menor espesor y delgadas capas de siltitas y lutitas, que alcanzan una potencia total de 800 m aproximadamente. Esta secuencia cambia su carácter litológico hacia el techo del Ordovícico, convirtiéndose en lutítico-siltítica en alternancia con delgados bancos de areniscas y cuarcitas que alcanzan un desarrollo superior a los 1000 m.

El miembro cuarcítico muestra los efectos de todos los movimientos orogénicos que afectaron al área; desde la orogénesis hercínica hasta los últimos movimientos andinos que reactivaron antiguas líneas de fallas, desarrollando potentes brechas tectónicas y zonas de intensa trituración de la roca competente. Estas últimas tienen formas más o menos lenticulares y la dirección es paralela al rumbo de los estratos. Las zonas brechosas sirvieron de trampa litológica para la deposición de minerales secundarios de uranio, como ocurre en el caso del yacimiento Esperanza. Por otro lado, las estructuras tectónicas probablemente fueron también aprovechadas por soluciones hidrotermales hipógenas con contenido de uranio, como lo ilustra el caso del yacimiento Yauricoya.

También se encuentra uranio en areniscas alteradas y asociado con fracturación y mineralización de cobre y cobalto, en la base del Cretácico, muy cerca de la discordancia con el Ordovícico, en el área de Chullchucani. Aunque las alteraciones de las areniscas se extienden a lo largo de muchos kilómetros, siempre en el mismo nivel estratigráfico, no se conoce aún su relación con mineralizaciones de uranio.

Por otro lado, es remarcable en la región la presencia de relictos de rocas volcánicas ácidas del tipo ignimbrita, tobas y lavas, que presumiblemente pertenecen a la formación Los Frailes, prácticamente erodada.

### 5.3.1. Yacimiento Esperanza

Se encuentran concentraciones importantes de minerales secundarios de uranio en fracturas de la zona brechosa que afecta a cuarcitas, areniscas cuarzosas y siltitas del Ordovícico. La zona brechosa con mineral de uranio visible aflora en una longitud de 40 por 1,60 m de espesor promedio, hasta una profundidad asumida superior a los 10 m. El tenor químico máximo de muestra representativa es del 0,39% de  $U_3O_8$ .

Ciertas investigaciones microscópicas y de difracción de rayos X efectuadas por Kim [17] indican que el mineral de uranio es metatorbernita y autunita en poca cantidad, asociadas con goethita y cuarzo recristalizado de la cuarcita.

La metatorbernita se presenta como relleno de fisuras. La goethita se desarrolla a lo largo del contacto entre la metatorbernita y la roca de caja, impregnando sus granos y dándole una coloración pardo-rojiza.

Se asume que las mineralizaciones de goethita y metatorbernita son contemporáneas, lo que permite concluir que el pequeño cuerpo mineralizado de Esperanza se formó por precipitación de material disuelto, en un ambiente supergénico de reducción formado por el hidróxido de hierro.

### 5.3.2. Yacimiento Yauricoya

Yauricoya es un antiguo yacimiento explotado anteriormente para la obtención de sulfuros de cobre, los cuales están en íntima asociación con minerales primarios de uranio. La mineralización se desarrolla en vetas a lo largo de fallas y zonas de intensa milonitización que afectan a arenisca cuarzoza, cuarcita y pizarras de edad ordovícica. Presumiblemente, el mismo sistema de fallas que afectó al área de Esperanza se extiende hasta Yauricoya.

Los minerales identificados [17] mediante estudios microscópicos y difracción de rayos X son: bornita, calcopirita, pechblenda, calcosina, calcita, esmaltita y covelina en orden decreciente. De acuerdo al conocimiento actual, no es posible determinar los parámetros físicos del cuerpo mineralizado. Análisis químicos de mineral seleccionado dieron valores del orden de un 16,6% de  $U_3O_8$ .

Sin embargo, la asociación mineral y las texturas de los minerales sugieren una precipitación a partir de soluciones de moderada temperatura en ambiente de reducción. Las texturas coloformes de la pechblenda observadas al microscopio [17] indican que se formó de soluciones coloidales de baja a moderada temperatura, ya que la pechblenda coloforme es conocida en muchos yacimientos mesotermiales.

### 5.3.3. Zona Chulchucani

En minas abandonadas de cobalto y cobre se han localizado manifestaciones de uranio contenidas en areniscas de estratificación fuertemente

entrecruzada, de grano fino a medio, con cemento calcítico. Estas areniscas pertenecen a la formación La Puerta del Cretácico.

Las mineralizaciones de cobre y cobalto se encuentran distribuidas en los planos de estartificación y en mayor concentración en las fracturas. Los minerales de uranio aparecen muy irregularmente distribuidos en algunas fracturas y siempre asociados con cobre y/o cobalto. La calcita es más abundante en las zonas mineralizadas.

Se han identificado los siguientes minerales: heterogenita, malaquita, azurita, autunita, metatorbernita, crisocola, esmaltita, covelina y uranofano (algunos de estos minerales fueron identificados por Kim [17]).

Las texturas y la química de los minerales presentes sugieren un origen supergénico por precipitación, en las areniscas porosas, de soluciones provenientes de lixiviación de minerales hipogénicos.

Finalmente, en un levantamiento de prospección aérea que cubre el 58% de la superficie total se han localizado 141 anomalías sobre afloramientos de rocas volcánicas de la formación Los Frailes, comprendiendo el distrito uranífero Sevaruyo. El control terrestre de las anomalías radiactivas, actualmente en progreso, permite adelantar que los resultados son muy positivos. Una prueba de ello es el reciente descubrimiento de un área muy promisoría denominada Cerro Tollojchi, dentro de la formación Los Frailes, en donde se registra fuerte radiactividad correspondiente a minerales de uranio, uraninita y zeunerita (determinados por difracción de rayos X). La radiactividad está asociada a mineralización económica de sulfuros de bismuto y plata (bismutina y argentita), acompañados de abundante cuarzo recristalizado, baritina y arsenopirita; se presentan también cantidades menores de pirita, bornita, galena, blenda y estibina.

La zona presenta fuerte silicificación, caolinización, sericitación e incipiente propilitización. Está fuertemente tectonizada. Toda la mineralización se asocia a la fuerte milonitización.

Las texturas mineralizadas son de relleno de espacios abiertos y de reemplazamiento. Los escasos datos disponibles actualmente permiten suponer una mineralización hidrotermal de moderada a baja temperatura.

## 6. INTERPRETACION GENETICA

Las mineralizaciones uraníferas presentes en los diversos yacimientos y manifestaciones circunscritas al distrito uranífero Sevaruyo obedecen a un ciclo definido de formación y se vinculan entre sí por originarse a partir de una roca fuente común, por un proceso de lixiviación y transporte exógeno y por precipitación y condiciones de entrapamiento muy similares.

## CUADRO II. CONTENIDO DE URANIO EN ROCAS VOLCANICAS RIOLITICAS Y RIODACITICAS (Según diferentes autores)

Ubicación geográfica	Contenido de uranio (ppm)
EE.UU., Oregón y Nevada	5,00
EE.UU., Colorado	9,20
EE.UU., California	3,80
Italia Central	25,00
Brasil, Bahía	2,41
Bolivia, Los Frailes	20–30

### 6.1. Roca fuente

Generalmente es aceptado que el uranio está asociado con las rocas más ácidas de la litosfera [15, 18–19]. Algunos granitos alcalinos, como el Granito Conway contienen hasta 10–12 ppm de  $U_3O_8$ . A nivel mundial, el promedio de concentración de uranio es de 3,5 ppm en granitos y de 1,8 ppm en rocas ígneas intermedias [18].

La sucesión de potentes unidades de tobas, ignimbritas y lavas de la formación Los Frailes es particularmente fértil en uranio. Valores determinados en numerosas muestras a través del complejo volcánico dan un contenido promedio de 20–30 ppm, que es uno de los más altos en rocas volcánicas (Cuadro II).

Por otro lado, la elevada radiactividad detectable, del orden de 200 a 300 cuentas por segundo y distribuida uniformemente, así como la presencia de cuarzo ahumado en todas las unidades volcánicas de la formación Los Frailes corroboran la fertilidad de estas rocas.

### 6.2. Lixiviación y transporte

La movilización de uranio se produjo durante el último ciclo erosivo (post-Los Frailes) por procesos de lixiviación superficiales y subterráneos con aporte, en algunos casos, de aguas vadosas y juveniles que atacaron a los componentes de las rocas volcánicas Los Frailes. La lixiviación del uranio se produjo con mayor intensidad en épocas de mayor pluviosidad (Pleistoceno), por la penetración de aguas meteóricas en las capas permeables, incorporando el ión uranilo ( $U^{6+}$ ) en soluciones alcalinas ácidas (pH muy bajo) de fácil transporte,

CUADRO III. RESUMEN DE LOS YACIMIENTOS Y MANIFESTACIONES DE URANIO DEL DISTRITO URANIFERO SEVARUYO

Yacimiento o manifestación de uranio	Geología		Control de la mineralización	Mineralización		Parámetros de la mineralización		
	Roca portadora	Edad		de uranio	asociados	Largo (m)	Potencia (m)	Profundidad (m)
COTAJE	Toba, ignim. riodacítica	Terciario Fm Los Frailes	Tectónico	Autunita, torbernita, cofinita, pechblenda	Baritina, pirita, marcacita, etc.	350	1-10	> 30
HUANCARANI	Toba, ignim. riodacítica	Terciario Fm Los Frailes	Tectónico	Autunita, torbernita	Oxidos de Mn y Fe	1500	0,5-6	?
TORKO	Lava andesítica	Terciario Fm Los Frailes	Tectónico	Autunita, torbernita	?	600	0-2	?
LOS DIQUES	Toba riodacítica	Terciario Fm Los Frailes	Tectónico	Autunita, torbernita	Opalo, óxidos de Fe	10-100	0,20-3	> 10
HUARANASA	Toba riodacítica	Terciario Fm Los Frailes	Tectónico	?	Opalo, óxidos de Fe	10-20	0,5-1	?
KUCHUTA	Toba riodacítica	Terciario Fm Los Frailes	Tectónico	?	Opalo, óxidos de Fe	5-10	0,10-0,5	?
SAN AGUSTIN	Toba riodacítica	Terciario Fm Los Frailes	Tectónico	Amarillos de uranio y pechblenda	?	± 80	± 30	?
THOLAPALCA II.	Toba riodacítica	Terciario Fm Los Frailes	Tectónico	Amarillos de uranio	?	20	0,10-0,5	?
ANTARAQUE	Toba riodacítica	Terciario Fm Los Frailes	Tectónico	?	?	50-100	0,10-0,20	?

CUADRO III. (cont.)

THOLAPALCA III	Toba riodacítica Areniscas volcánicas	Terciario Fm Los Frailes	Sedimentario	Autunita, torbernita, bolwoodita, uranofano $\beta$	?		0,1-2	?
THOLAPALCA I	Toba riodacítica Areniscas volcánicas	Terciario Fm Los Frailes	Sedimentario	Autunita, torbernita, bolwoodita, uranofano $\beta$	?		?	?
ASUNCION	Toba riodacítica	Terciario Fm Los Frailes	Sedimentario	?				
COROMA	Relleno paleofluvial	Cuaternario ( ? )	Sedimentario	?	Oxidos de Mn, Fe	?	?	?
PAHUA	Sedimentos	Cretácico Fm Mulasi	Sedimentario					
SANTIAGO DEL ARCO	Sedimentos	Cretácico Fm Mulasi	Sedimentario					
TANSILLA	Sedimentos	Cretácico Fm Mulasi	Sedimentario					
MINA AMISTAD	Arenisca continent.	Terciario Fm CHAMARRA	Mixto	Torbernita, autunita	Carbonatos de Cu, Co, sulfuros	100	0,5-1,50	?
LA CALERA	Tobas y calizas	?	Mixto	?	Estibina, pirita, pirrotina			
WICHAJLUPE	?	?	Mixto	?	Travertino			

en condiciones de oxidación o cerca de la superficie, en donde éste reacciona de manera diversa con el ambiente geológico.

El intemperismo y lixiviación produjeron intensa argilitización y oxidación de los componentes máficos, con mayor intensidad en algunos niveles, los que posteriormente se convierten en importantes factores de precipitación de los minerales de uranio. Este rasgo es común a todos los indicios de uranio del distrito.

### 6.3. Precipitación de uranio

La precipitación del ión uranilo es controlada por factores químicos y físicos. El principal factor químico es la reducción de las soluciones (paso a  $U^{4+}$ ) hasta su neutralidad ( $pH = 7$  y  $eH = 0$ ), lo que puede producirse por la presencia de  $H_2S$  y  $CO_2$  provenientes de las fuentes termales y aguas surgentes frías, en zonas de saturación [15, 19]. La reducción química afecta también al hierro y manganeso. En ausencia de elementos reductores, las propiedades adsorbentes del material arcilloso pueden representar un papel importante.

Los factores físicos están representados por el entrapamiento tectónico producido durante el último ciclo tectónico que afectó a la formación Los Frailes y por el entrapamiento sedimentario en las cuencas de subsidencia. Ambos, junto con la infiltración, el bajo índice de percolación, la sobresaturación de soluciones y la reducción química, producen la concentración y formación de cuerpos mineralizados de uranio.

En los yacimientos del distrito uranífero Sevaruyo es importante notar que es necesaria la concurrencia tanto de factores químicos como físicos.

## 7. CLASIFICACION DE LOS YACIMIENTOS Y MANIFESTACIONES URANIFERAS DEL DISTRITO SEVARUYO

La mineralización de uranio en todos los yacimientos y manifestaciones del distrito, de acuerdo con los datos conocidos, consiste en “epigenéticos” originados por “enriquecimiento supergénico”. La mecánica de formación, controles de la mineralización y las asociaciones minerales determinadas hasta la fecha, tomando como rasgo común la reducción química, proporcionan criterios básicos que permiten distinguirlos en tres grupos (Cuadro III).

### 7.1. Control tectónico

Se trata de minerales de uranio concentrados por sobresaturación, con bajo índice de percolación de soluciones supergénicas, en tobas e ignimbritas brechosas, falladas y fracturadas, con control estrictamente tectónico. Este

tipo de yacencia está representado por el yacimiento Cotaje. Pertenecen a este grupo los yacimientos Huancarani, Torko, Los Diques y las manifestaciones de uranio Huaranasa, Kuchuta, San Agustín, Tholapalca II y Antaraque.

La asociación mineral en estos yacimientos está caracterizada por autunita, meta-autunita, torbernita, cuprosklodowskita, cofinita, pechblenda (uraninita botroidal). Los minerales asociados son pirita, marcasita, melnicovita, baritina, blenda, galena, ópalo y óxidos de manganeso y hierro.

La mineralización está contenida en complejos sistemas de vetillas e impregnada en la roca.

## 7.2. Control sedimentario

Son minerales de uranio precipitados por sobresaturación de soluciones epigénicas, en zonas alteradas de ciertos niveles tobáceos y sedimentarios varios. La alteración de la roca y la concentración del uranio tuvieron lugar durante la vigencia de un ambiente lagunar dentro de las cuencas de subsidencia, actualmente abiertas y parcialmente erosionadas. La mineralización de uranio se encuentra diseminada en tobas e ignimbritas y está asociada con caolín, montmorillonita y limonita.

La asociación mineral está determinada por autunita, torbernita, boltwoodita y uranofano beta.

La morfología de los cuerpos mineralizados es de costras de espesores y distribución irregular.

El yacimiento tipo de este grupo es Tholapalca III e incluye las manifestaciones de uranio Tholapalca I, Asunción, Coroma, Pahuá, Santiago del Arco y Tansilla.

## 7.3. Genética mixta

Se trata de yacimientos formados por la precipitación de minerales de uranio, mediante la mezcla de soluciones superficiales carbonatadas y alcalinas, que son posiblemente las únicas que aportaron el uranio, y soluciones sulfurosas ascendentes provenientes de aguas vadosas y juveniles portadoras de otros iones y diferente pH. La mineralización está controlada por porosidad y permeabilidad extrema y fracturación de la roca huésped en algunos casos.

Las soluciones carbonatadas se produjeron por influencia de las rocas calcáreas de la formación Minchín y por travertinos de origen endógeno.

La asociación mineral característica consiste en minerales de uranio diseminados, torbernita y autunita, asociados a sulfuros como pirita, pirrotina, bornita y estibina y a carbonatos de cobre (malaquita, azurita, etc.); todos acompañados de abundante óxido de hierro (limonita), manganeso (pirolusita) y calcita-aragonita.

Mina Amistad es el yacimiento tipo de este grupo, al igual que las manifestaciones uraníferas La Calera y Wichajlupi.

La única evidencia de la acción del hidrotermalismo hipogeo en el área es la presencia de yacimientos polimetálicos (Sn, W, Ag, etc.) con características de dos fases de mineralización de alta y baja temperatura [20], relacionados con stocks subvolcánicos consolidados en profundidad (tal es el caso del yacimiento Carguacollo).

Los yacimientos hidrotermales, por tanto, se habrían formado en épocas anteriores a la mineralización de uranio. La única posibilidad de relación con la mineralización de uranio es la removilización de las partes superiores de estos yacimientos, de manera que pudieran aportar algunos iones e incorporarlos al proceso que dió origen a las mineralizaciones de uranio.

## 8. CONCLUSIONES

El interés económico de los yacimientos y manifestaciones localizados en la formación Los Frailes y su área de influencia estriba en la posibilidad de explotarlos a bajos costos y recuperar el uranio mediante procesos económicos, tal y como se está haciendo hasta la fecha en el yacimiento Cotaje.

En lo que se refiere al distrito uranífero Sevaruyo, se puede afirmar que los yacimientos de uranio de cada grupo presentan los mismos caracteres, pero difieren unos de otros en detalle.

Las evidencias de que la mineralización de uranio tuvo lugar a partir de la finalización del ciclo volcánico (a fines del Plioceno) permiten afirmar que siguen teniendo lugar procesos genéticos actualmente, aunque con mucha menor intensidad. Por otro lado, la intensa erosión que sufre la formación Los Frailes afecta también a la conservación de algunos yacimientos tales como Tholapalca III y Asunción, los cuales han sido erodados en gran parte.

Si consideramos que la teoría de génesis, epigenética-supergénica es correcta, la mineralización de uranio es superficial, lo que podría constituir un factor limitante de las dimensiones de los yacimientos en estudio y por descubrir. Pero si se consideran los controles geológicos de los diferentes grupos de yacimientos, la posibilidad de encontrar otros nuevos en la formación Los Frailes y en áreas vecinas con condiciones de yacencia similares es muy grande, aunque no se espera el descubrimiento de grandes yacimientos. No obstante, cabe suponer la existencia de un apreciable potencial uranífero en el área a medida que avanza la actividad de prospección.

Finalmente, en la formación Los Frailes parecen concurrir dos tipos de mineralizaciones de uranio. El primero, que es el más conocido hasta hoy, es el originado por procesos supergénicos y vinculado a la naturaleza de las rocas volcánicas. El segundo tipo, que se manifiesta más claramente en el borde

oriental, es de tipo endógeno originado a partir de soluciones hidrotermales. Este último es más visible debido a la gran erosión, como lo demuestran los rasgos del hidrotermalismo que formó los grandes yacimientos de metales base en Bolivia.

## AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su reconocimiento a la COBOEN, por brindarle la oportunidad de cristalizar el presente trabajo. Igualmente hace extensivo su agradecimiento a todos los colegas y personal técnico de COBOEN que colaboraron en su elaboración. Las discusiones técnicas sostenidas por el autor con el Dr. E.J. Rodríguez, J. Taylor y R. Cornejo fueron particularmente de mucha utilidad.

## REFERENCIAS

- [1] AHLFELD, F., Geología de Bolivia. Enciclopedia Boliviana, La Paz, Bolivia (1972) 190.
- [2] PEREZ, M., Estudio geológico del área Sevaruyo-Salar de Uyuni, Prov. L. Cabrera, Dpto. Oruro, UMSA, Universidad de La Paz, Tesis inédita, 1963.
- [3] KRIZ, S.J., CHERRONI, C., Diagramas correlativas de formaciones cretácicas del sudoeste de Bolivia, GEOBOL, Hoja informativa N° 2 (1965).
- [4] EVERNDEN, J.F., KRIZ, S.J., CHERRONI, C., Correlaciones de las formaciones terciarias de la cuenca altiplánica en base a edades absolutas determinadas por el método K/Ar, GEOBOL, Hoja informativa N° 1 (1966).
- [5] Levantamiento Mineralógico Piloto de la Cordillera y el Altiplano, Informe PNUD/ GEOBOL, NU, Nueva York, y GEOBOL, La Paz (1965).
- [6] PARERA, C.A., Prospección y evaluación de materias primas nucleares, OIEA wp/5/680, Informe al Gobierno de Bolivia, COBOEN, Comunicación interna (1971) 24.
- [7] APARICIO, A., Cotaje. Prospección de minerales radiactivos y evaluación preliminar, UMSA, Universidad de La Paz, Tesis inédita, 1973.
- [8] BELLUCO, A.E., Prospección de minerales de uranio (Cotaje y Marquez), OIEA wp/5/1208, Informe al Gobierno de Bolivia, COBOEN, Comunicación interna (1977) 32.
- [9] SANTIVÁÑEZ, R., Estudio petrográfico de la región de Sevaruyo (Wichajlupi), UMSA, Universidad de La Paz, Tesis inédita, 1977.
- [10] RITTMANN, A., Les volcans et leur activité (Masson et Cie., Eds), París (1963) 461.
- [11] GANGLOFF, A., Bordereau N° 4067, Cotaje (Potosí-Bolivia), CEA (Francia) y COBOEN, Comunicación interna, 1972.
- [12] BRANCHE, Bordereaux Nos. 4148 y 3611, Bolivia-Cotaje, CEA (Francia) y COBOEN, Comunicación interna, 1972.
- [13] BALDERRAMA, I., Introducción al estudio de depósitos de uranio en Bolivia, Soc. Geol. Bol., Bol. 20 (1973) 145-152.
- [14] VIRREIRA, V., "Áreas potenciales de uranio en Bolivia", Anales de la IV Convención Nacional de Geología, La Paz, Vol. II (1975) 621.

- [15] ADLER, H.H., "Concepts of uranium-ore formation in reducing environments in sandstones and other sediments", *Formation of Uranium Ore Deposits* (Actas Simp. Atenas, 1974), OIEA, Viena, IAEA-SM-183/43 (1974) 141.
- [16] HOMESTAKE MINING COMPANY, *Evaluación Técnica de las Posibilidades Económicas de Yacimientos de Uranio en Bolivia*, COBOEN, Informe interno, La Paz, Bolivia (1973) 31.
- [17] KIM, SOO JIM, *A Study on the Mineralogy and Genesis of some Uranium Ores from Bolivia*, Department of Geology, Seoul National University, Comunicación interna, COBOEN (1978) 18.
- [18] BOWIE, S.H.U., "Some geological concepts for consideration in the search for uranium provinces and major uranium deposits", *Uranium Exploration Geology* (Proc. Panel Viena, 1970), OIEA, Viena (1970) 285.
- [19] MITTEMPERGHER, M., "Exhalative-supergenic uranium mineralization in the quaternary alkaline volcanic rocks of Central Italy", *Uranium Exploration Geology* (Proc. Panel Viena, 1970), OIEA, Viena (1970) 177.
- [20] THORMANN, W., *Investigaciones preliminares sobre la geotectónica y metalogénesis de la zona Challapata-Caxata (Bolivia)*, GEOBOL, Bol. N° 7 (1966) 118.

## DISCUSSION

A.E. BELLUCO: What is the present situation with regard to the general prospecting in the Los Frailes district?

A. APARICIO: We cannot yet say that the prospecting work is finished. An aerial prospecting programme recently revealed a new area with different characteristics — a sedimentary lacustrine phase inside Los Frailes. This series commences with a stratified tuff and continues with silicified clays, limolites and sandstones which are again highly silicified. The uranium mineralization associated with Bi and Ag occurs in zones of intense mylonitization. This is very preliminary information since the discovery is quite recent and few data are available.

M. MARTIN: It is interesting to have the results of the uranium analysis on the ignimbritic weathered tuffs, the enclosing rocks surrounding the deposit you described, and the non-weathered tuffs. Ignimbrites of this type are common in northern Chile and it is useful to be able to make comparisons with those from the Los Frailes formation.

A. APARICIO: Table II is relevant here. It gives a comparison of the  $U_3O_8$  contents of volcanic rhyodacite rocks in different parts of the world. It is clear that the values for the Los Frailes formation (20–30 ppm) are among the highest. The analyses were made on samples of fresh rock. Weathered tuffs, as I described, usually have anomalous values.

## GEOLOGY OF THE ESPINHARAS URANIUM DEPOSIT, BRAZIL

R.K. BALLHORN  
Urangesellschaft mbH.,  
Frankfurt am Main,  
Federal Republic of Germany

V.K. THAKUR, J.E.C. DA FONTE,  
V. SUCKAU  
NUCLAM-NUCLEBRAS Auxiliar de Mineração S/A,  
Recife,  
Brazil

### Abstract-Resumen

#### GEOLOGY OF THE ESPINHARAS URANIUM DEPOSIT, BRAZIL.

Situated on the limb of an anticline structure in an amphibole-biotite gneiss the Espinharas deposits present an interesting type of mineralization. The main radioactive rock is a reddish, porous feldspathic rock (oligoclase and albite) varying in size from pegmatitic to fine crystalline, with minor apatite, carbonate and muscovite. Primary quartz seems absent. Pitchblende and secondary uranium minerals (mainly uranophane) are locally visible. Tiny uraninite crystals occur on grain boundaries and as inclusions in the feldspars. The uranium-thorium ratio is higher in case samples compared to surface samples. The processes that may be responsible for such unusual mineralogical and chemical composition are not yet known. Several possibilities are discussed.

#### GEOLOGIA DEL YACIMIENTO DE URANIO DE ESPINHARAS, BRASIL.

Situados en el flanco de una estructura anticlinal en un gneis anfíbol-biotita, los yacimientos de Espinharas presentan un tipo interesante de mineralización. La principal roca radiactiva es una roca feldespática porosa de color rojizo (oligoclasa y albita) cuyo tamaño varía entre el de las pegmatitas y el de las rocas cristalinas finas, con pequeñas cantidades de apatito, carbonato y muscovita. El cuarzo primario parece ausente. Son localmente visibles la pitchblenda y minerales secundarios de uranio (sobre todo uranofano). Se presentan diminutos cristales de uraninita en los contactos intergranulares y como inclusiones en los feldespatos. La razón uranio-torio es más alta en las muestras tomadas del corazón que en las de la superficie. No se conocen aún los procesos que puedan haber causado una composición química y mineralógica tan poco corriente. Se examinan varias posibilidades.

### INTRODUCTION

The uranium deposit of Espinharas (longitude 06° 51' 00", latitude 37° 20' 00") is located close to the village of São José de Espinharas, which is roughly 25 km

north of the city of Patos in the state of Paraíba, NE Brazil. Patos, with a population of 60 000, is well served by a main highway, railway and a small air strip. An all-weather dirt road connects Patos with São José de Espinharas.

The deposit is located in an area of flat topography, around 200 m above sea level. The climate is semi-arid, with temperatures varying between 20° to 35°C. The average precipitation is 450 to 500 mm and is confined to the period January to May. The small River Espinharas is a good source of water supply almost all year round. Very little soil cover exists, and the common vegetation is a dense shrub locally known as 'Caatinga'.

## HISTORY

The anomaly was originally discovered in 1972 during a regional car-borne survey that was carried out by NUCLEBRAS, using a simple scintillation counter. The anomaly, which was only one out of a large number of radiometric anomalies, was briefly ground-checked and sampled, though not regarded as an anomaly of high priority. In fact, the strongly weathered and porous outcropping host rock was briefly considered to be a meta-arkose. Also, the chemical results of the surface samples indicated high thorium values with a U/Th ratio of 1:1.7.

Reinvestigation of the anomaly by NUCLAM in 1975 revealed the 'intrusive' nature of the radioactive rock, which was identified as a syenitic dyke. Surface exploration, followed by diamond drilling, was started in 1976 and the following steps were taken:

- (a) Surface radiometric survey and outcrop sampling
- (b) Surface geological mapping on a scale of 1:1000
- (c) Trenching, initially on a 200 m, followed by a 50 m-spacing, with systematic chip sampling and mapping of the trenches
- (d) Diamond drilling as follows:

1977 – 13 drill holes = 2 719 m

1978 – 30 drill holes = 10 000 m (approximately)

All the holes are inclined (40 to 45°) and range in length from 200 to 600 m.

The drilling results indicate a potential of 5000 to 10 000 tons of  $U_3O_8$ , depending upon cut-off grades and other technical and economic considerations. The grades range from several 100 ppm to 0.3%  $U_3O_8$ ; the majority of the grades reaching economically attractive thicknesses are around 0.06–0.12%  $U_3O_8$ .

## GENERAL GEOLOGICAL SETTING

Geological pioneer work was done in the area between 1902 and 1947, the stratigraphy was established in the late 1960s enabling a regional geological map on a scale of 1:250 to be published, and in 1973 geosynclinal development was applied. Continuing work has contributed to the knowledge of the area.

The area of interest is part of the so-called Cariri orogenic belt, which extends from the state of Ceará in the north to Bahia, bordering older cratons. This belt comprises various depositional basins, one of them being the Serido trough. The area under discussion has been deeply eroded and rocks of Middle and Lower Proterozoic and even Archean age are locally outcropping.

Although a confusing number of stratigraphic names are used for rock units of the crystalline basement of north-east Brazil, most of the various stratigraphic columns show a sub-division of the sedimentary filling of the Serido trough into two sedimentary sequences. A basal psammitic unit, which includes a high amount of basic volcanics, is followed by limestones and fine clastic material. This sequence is characterized by rapid facies changes, discontinuity of its lithological units and changes in thickness.

The upper unit, which is possibly separated from the basal unit by a weak unconformity, represents a very similar sedimentary cycle except for the deposition of a thick sequence of fine clastic material in the upper part. The identification of the basal unit and its contact with the underlying basement is a matter of conjecture and very difficult to recognize because of intensive migmatization which led to complete convergence between both units.

The metamorphic/magmatic history of the Serido trough is well documented by age determinations. The main orogenic event is called the Brazilian orogeny, which can be divided into three periods:

- (1) Regional metamorphism and anatexis, which led to remelting of large portions of the underlying basement and the formation of syntectonic granitoid masses, took place between 650 and 710 million years ago
- (2) The second event can be attributed to thermal metamorphism in connection with the intrusion of large magmatic bodies
- (3) During the postorogenic stage, about 520 to 450 million years ago, highly differentiated alkali-granites and pegmatites intruded, preferentially following zones of weakness.

A great portion of the basement is made up by rocks of plutonic appearance. Because of their structural setting four types of plutons were distinguished:

- (a) Late orogenic alkali-granite (Catingueira type)
- (b) Late orogenic alkali-granite (Itapetim type)
- (c) Late orogenic porphyritic alkali-granite (Itaporanga type)
- (d) Syn-orogenic granodiorite-tonalite (Conceição type).

Various smaller bodies of basic and ultrabasic composition are known, but their chronological position is still uncertain.

## REGIONAL STRUCTURE

The structural pattern of the Precambrian polymetamorphic terrain is quite complex. One of the most conspicuous structural features is the east-west striking Patos lineament, which can be followed for several hundred kilometres. The lineament is not the result of a single compressional event but has been reactivated several times. The dominant structural grain is NNE. The metamorphic rocks generally display broad anticlines and synclines, though locally also isoclinal folding can be observed. Numerous steep-dipping tensional faults with prominent NE and NW directions have developed. Some of these are occupied by late orogenic alkali-granites, pegmatites and quartz veins.

## RADIOMETRIC ANOMALIES

More than 80% of the encountered anomalies are confined to the alkali-granites (a, b, and c above), associated granitoids, migmatites and granitic gneisses. The radioactivity is generally low (2 to 3 times background) but quite extensive (several square kilometres) with thorium predominating (10 times more thorium).

Secondary uranium minerals can be observed on the surface, in fractures and joint planes of granitic rocks. They are most likely a result of the semi-arid climate.

About 20% of the anomalies are found associated with various rock types such as quartz veins, tactites, amphibolite, mylonite and biotite schist. Except for a few spot uranium values, most of them have a high thorium content.

Five promising anomalies are encountered in and associated with a feldspathic rock of unusual composition. Espinharas is a typical anomaly of this group and will be discussed in more detail in the following section.

## LOCAL GEOLOGICAL SETTING

The deposit is situated on the limb of an anticline plunging due NNE. The prominent rock type is an amphibole-biotite gneiss with minor intercalations of amphibolites and some tactites. The entire sequence belongs to the middle part of the Caico Formation. The gneiss has been intruded by numerous thin (a few centimetres to 5 m) dykes of a late orogenic alkali-granite (Itapetim type) and associated pegmatites. A 50 to 20 m thick dyke of the same granite runs parallel to the deposit and outcrops extensively 2 km east of the anomaly. An ultrabasic

rock, identified as orthopyroxene-fels, is also found cutting through the amphibole-biotite gneiss.

Beyond the western end of the anomaly there exists a basement complex made up of granodiorite, porphyritic granite and dykes of fine-grained alkali-granite to which the above mentioned granite dykes, which cut through the amphibole-biotite gneiss, may be connected.

The general strike is N10° to 30° E, and the dip of the foliation 30° to 60° due NW. A regional tension fault, striking ENE and dipping 50° to 70° due NW, is the main structural feature of the area. It is a sympathetic fault to the Patos lineament, and is older than the mineralization. Numerous minor younger faults cutting through the main fault zone have also been recorded. These are younger than the mineralization and have off-set the ore body in numerous blocks.

The mineralization has a strike length of approximately 2200 m. At the surface the width is 20 to 120 m, sometimes with various intercalations of unmineralized rock. The dip of the body varies but seems to be between 70° close to the surface, and about 50° at a depth of 150 m. It has been confirmed by drilling to 200 m of vertical depth, and it continues down dip.

## MINERALOGY/PETROLOGY

The main radioactive rock is a reddish, quite porous 'spongy' feldspathic rock, which varies in grain-size from coarse pegmatitic to fine crystalline. Veinlets of calcite are common and sulphides are locally visible. This rock occurs as 'dykes' and 'veins', ranging in thickness from a couple of centimetres to 100 metres. The enclosing rock, most frequently a amphibole-biotite gneiss, is infiltrated by pink feldspar which gives the gneiss a mottled appearance. This mottled gneiss is generally quite radioactive and can be distinguished macroscopically quite easily.

The petrographic features and mineralogical composition of the radioactive rock types are unusual. The feldspathic rock consists virtually entirely of feldspar, predominantly of plagioclase (oligoclase and albite: 77 vol.%–94 vol.%), of some biotite which is partly altered to chlorite, and of minor amounts of apatite, carbonate, muscovite and hydromica. No primary quartz seems to be present. Albitization is widespread and is the most outstanding feature ( $\text{Na}_2\text{O}$ : 5.6% – 10.0%).

The feldspars are generally stressed, marginally granulated and recrystallized. Single feldspar crystals are xenomorphic, often randomly set in a medium- to fine-grained mosaic of the same mineral. Overgrowth of clear fresh albite is common, open spaces created during brecciation and fracturing are aligned with clear albite.

In case of strong albitization the original plagioclase is being irregularly replaced by albite along fissures and microfractures. Feldspars are generally cloudy because of strong argillaceous alteration. Biotite and/or chlorite form(s) the only mafic

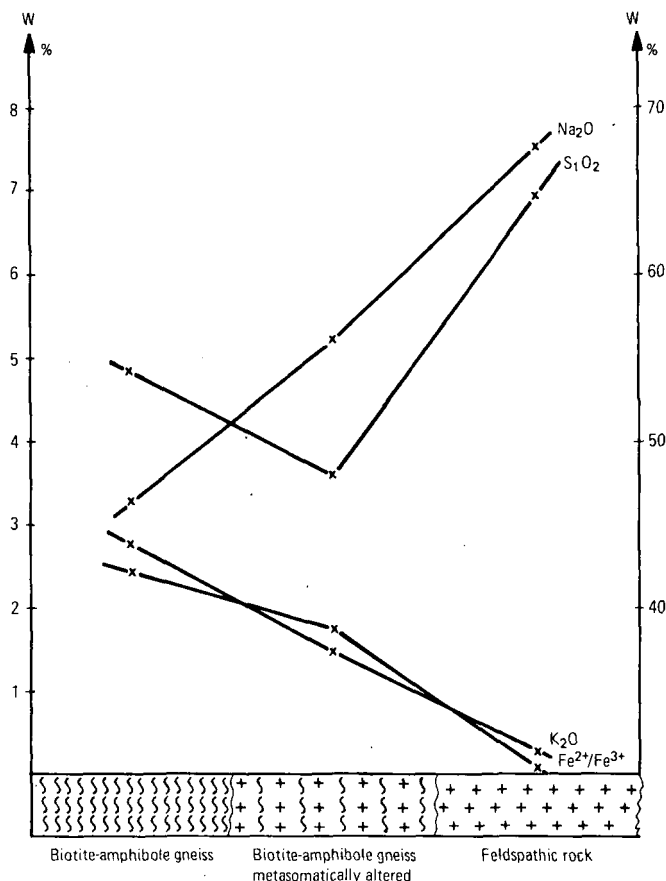


FIG.1. Behaviour of Fe, K, Na and Si in the mineralized and unmineralized rocks.

constituent. Biotite flakes are often changed to chlorite; alteration starts with decoloration and exsolution of Fe-oxides. Sometimes they are replaced by calcite or epidote. The main accessories are apatite and carbonate, which are dispersed throughout the rock and most likely represent a 'hydrothermal' phase.

The mineralized country rock is most frequently a biotite-amphibole gneiss rich in plagioclase and minor amounts of quartz. The latter can be missing. The feldspars are intensively altered to form a mixture of sericite, calcite, epidote and hydromica. Albite overgrowth is common. Biotite shows incipient alteration to chlorite. The additions of Na are well illustrated by the replacement of common green amphibole by arfvedsonite (Na-amphibole) along fractures and around the edges. Minor amounts of calcite, titanite, epidote and apatite are present.

The most conspicuous difference between mineralized and unmineralized biotite-amphibole gneiss is the intensive hydrothermal alteration of plagioclase and biotite, as well as the Na-metasomatism (Fig.1). In addition, a slight though distinct increase of the feldspar and a decrease of the quartz content can be observed:

Feldspar: 58 vol.% unmineralized, 64 vol.% mineralized

Quartz: 5 vol.% unmineralized, 1 vol.% mineralized.

Similar phenomena are recognizable in amphibolites that were subjected to the metasomatic-hydrothermal process which affected the amphibole-biotite gneiss.

A close spatial relationship seems to exist between the feldspathic rock and a medium-to fine-grained alkali-granite.

## RADIOACTIVE MINERALS

The identification of radioactive minerals proved to be quite difficult because of the particle size and the lack of highgrade concentrations. Pitchblende and secondary uranium minerals (predominantly  $\beta$ -uranophane) are locally visible. In thin sections, different radioactive minerals have been recognized, such as uraninite and allanite. Others have still to be identified by different methods, such as microprobe analysis. Tiny uraninite crystals (generally  $<100 \mu\text{m}$ ) with conspicuous zonation are sitting on grain boundaries and occur as inclusions in feldspar.

Autoradiographs show that the radioactivity is concentrated in spots as well as being diffused throughout the rock. The latter mode of occurrence may be a result of secondary redistribution.

## GEOCHEMISTRY

The peculiar petrographic-mineralogical features of the feldspathic rock are well reflected in its chemical composition. Most remarkable is the very low content of potassium (0.1 to 0.6 wt%) and the high content of sodium (6 to 10 wt%) and calcium (1 to 4 wt%, not caused by an abnormal apatite content).

An increase of the rare-earth contents of the yttrium group seems to exist. The content of most other trace elements is below detection limit of routine methods. Comparing surface and core samples (which are not affected by surface leaching), the important difference is a sharp increase of the uranium-thorium ratio in core samples (surface samples:  $\text{U/Th} = 1/1.7$ ; core samples:  $\text{U/Th} = 3.7/1.0$ ).

Although only a few core samples have as yet been analysed for major rock elements and trace elements, geochemical trends become apparent if mineralized and unmineralized country rocks are compared. The ratio of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ,

and Cl decreases from unmineralized to mineralized country rock, and the ratio of  $\text{Na}_2\text{O}$ , CaO, Y, Yb, and F increases.

## GENETIC SPECULATIONS

The processes that may have been responsible for the unusual mineralogical and chemical composition are as yet difficult to decipher, the reason being that the new district, which is being developed in NE Brazil, has apparently little in common with most of the known uranium occurrences of the western world. Some similarities exist to the 'epi-syenites' in the Central Massif of France. This concept is favoured by NUCLEBRAS geologists, with regard to their U deposit in the state of Ceará, 500 km north of Esplanharas, and is probably a result of the same mineralizing events.

Several possibilities can be put forward to explain the intensive hydrothermal alteration, the sodium-metasomatism, strong fracturing and brecciation, structural control of emplacement, mode of occurrence and rock composition. Three are listed below:

- (1) A highly differentiated alkali melt, rich in volatile compounds, intruded along a deep fault structure. Escaping fluids from the crystallizing melt infiltrated the enclosing rock and tended to move further upwards following a steep P-T gradient.
- (2) The feldspathic rock was originally some kind of acidic intrusive dyke-shaped body that intruded along a zone of weakness and was later completely altered by intensive sodium-metasomatism and by hydrothermal processes in connection with renewed movement along the old structure which once served as the pathway for the intrusion.
- (3) The feldspathic rock might have been formed by crystallization from a sodium and carbonate-rich fluid phase, which escaped from a deep-seated source and moved upwards along zones of high permeability, i.e. faults and breccia zones. The highly volatile character of the phase may be the reason for thick zones of infiltration into the enclosing rock, particularly the amphibole-biotite gneiss, but also into the granitic rocks.

## SIMILAR OCCURRENCES IN BRAZIL AND IN OTHER PARTS OF THE WORLD

As already mentioned, we are dealing with a new uranium district in Brazil. A number of similar occurrences are presently being explored by NUCLAM in Paraíba and Pernambuco. In each case, intense metasomatic alteration of all kinds of metamorphic and intrusive rocks has led to albitization, haematitization (sometimes more conspicuous than albitization) and, of course, uranium/thorium

mineralization of varying intensities. Most of the time a high content of  $P_2O_5$  (up to 10–12%) is recorded. North of NUCLAM's area of activity, NUCLEBRAS is exploring somewhat similar occurrences. There is little doubt that more mineralizations of this type will be found in NE Brazil.

The possibility of finding similar occurrences in other parts of the world is rated high. However, because of a relatively low-grade and complex mineralogy, little attention has been directed to these occurrences in the past. Uranium occurrences in north and east Africa, as well as in Canada, do exist, which, according to their description in literature, show similar geological and mineralogical features although their economic significance has sometimes not been fully recognized and evaluated.

This seems to be different within countries with centrally planned economies where extensive literature exists concerning the concentration of radioactive elements in alkali-rocks, metasomatites, albitites, etc.

## EXPLORATION GUIDELINES

The most important favourability criteria that have to be kept in mind when looking for similar new occurrences around the world are as follows:

- (1) All the known occurrences are associated with large structural features, frequently representing tension faults close to regional lineaments.
- (2) The occurrences known to date are confined to Precambrian rocks. Whether these are of orogenic or cratonic origin is uncertain. It is clear, however, that intense regional rejuvenation of basement rocks is a pre-requisite for the U mineralizations.
- (3) Rocks of good permeability, having a high feldspar content, seem to offer favourable conditions. The chemical composition of the rock affected by the metasomatic-hydrothermal event may be important insofar as the U/Th ratio seems to be influenced in favour of U by a higher Fe-content.
- (4) Regional sodium-metasomatism, which is often described independently of uranium geology, could be an important clue as well. Signs of albitization, fenitization and similar features should be taken into account. Anomalous concentrations of rare earths and phosphate minerals might offer some additional hints.

It is clear that the Precambrian of NE Brazil has its continuation in West Africa and it would thus be logical to look for similar occurrences on the other side of the Atlantic Ocean.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank NUCLAM for the permission to publish this paper, which is the result of the work of many unnamed company geologists. We are especially grateful to H. Fuchs, who, as the first Technical Director of NUCLAM, supervised and encouraged the exploration of this deposit.

## DISCUSSION

A.E. BELLUCO: With regard to the content of the calcareous rocks, can you tell us whether any attempts have been made to determine possible treatments and values for recovery from this type of mineral, and perhaps what the economic value of these models is?

A. SIEGERS: First leaching experiments of still preliminary character indicate that a high solubility and extraction rate can be achieved by using high acid concentration. The economic viability will largely depend on further exploration results, but we regard the indications so far as encouraging.

H.J. GOSO: What is the importance of the metasomatic process in relation to the Brazilian tectonic cycle?

A. SIEGERS: The geological field observations do not give any clear evidence whether the metasomatic process is related to the tectonic cycle of Brazilian age or to some other major tectonic event. There seems to be an intimate relationship between the uranium mineralization and the metasomatic process.

P.D. TOENS: Is there a magnetic anomaly associated with this deposit?

A. SIEGERS: There isn't any magnetic anomaly associated with the Espinharas uranium deposit.

J.Z. PASQUALI: I wonder if the haematitization is related to surface effects?

A. SIEGERS: The phenomenon of the haematitization seems to be closely related to the mineralization process. Strong haematite staining was still recognized in the deepest mineralized intercepts with similar degree compared to the near surface samples. We regard the haematitization as a preliminary feature.

C. PREMOLI: Among the three possible genetic theories you have mentioned for Itataia mineralization you seem to indicate a deep seated ultra-differentiated magma possibly enriched in its 'residual' constituents. I wonder in this respect what are the concentrations of titanium, zirconium and niobium in the Itataia complex.

A. SIEGERS: We have no data at hand concerning the concentration of these elements in the Itataia deposit. But speaking for the Espinharas deposit we didn't find any anomalous concentration of the elements you mentioned before.

U.G. CORDANI: I wish to emphasize the apparent importance, at the Espinharas occurrence, of some of the general criteria which I commented upon in my talk in this meeting, such as the rejuvenation of an older basement within a

younger mobile belt. The uranium mineralization at Espinharas is confined to the Caicó Formation, which is a polymetamorphic unit belonging to the basement of the Caririan belt, of Brazilian age. In addition, several bodies of alkali-granites, of presumably Brazilian age, have been found in the vicinity. Incidentally, within the Seridó belt, the majority of the known radiometric anomalies are confined to alkali-granites and associated granitic bodies.



## GEOLOGY AND MINING DEVELOPMENT OF THE C-09 URANIUM DEPOSIT

R. SANTOS  
NUCLEBRAS (DIN),  
Rio de Janeiro,  
Brazil

### Abstract-Resumen

#### GEOLOGY AND MINING DEVELOPMENT OF THE C-09 URANIUM DEPOSIT.

The uranium deposit at Campo do Cercado is the first one in Brazil to reach the stage of mining operations. Located in the alkaline volcanic complex of Poços de Caldas, the deposit is divided into three ore bodies which lie at the edge of a secondary crater in the caldera. Uranium ore occurs in the primary form in association with volcanic breccia belts (body A), as well as a result of hydrothermal action (body B); it is also present in the secondary form (body E) as a product of the leaching of the breccia belts by the oxidation front, followed by concentration and deposition in a reduction zone. The mineralization takes the form of black uranium oxides ( $\text{UO}_2/\text{UO}_3$ ), and, more rarely, coffinite. Pyrite, galena and fluorite are almost always present. Molybdenum is also found in close association with the uranium ore in quantities considered economically viable. The ore reserves of the Poços de Caldas plateau are estimated at 26 800 t.

#### DESARROLLO GEOLOGICO Y MINERO DEL YACIMIENTO URANIFERO C-09.

El yacimiento uranífero do Campo de Cercado es el primero en el Brasil que ha alcanzado la etapa de explotación minera. Situado en el complejo volcánico alcalino de Poços de Caldas, el yacimiento está dividido en tres cuerpos mineralizados que yacen al borde de un cráter secundario en la caldera. El mineral de uranio se presenta en forma primaria en asociación con franjas de brechas volcánicas (cuerpo A), y como resultado de la acción hidrotermal (cuerpo B); también se presenta en forma secundaria (cuerpo E) como producto de lixiviación de franjas de brechas por el frente de oxidación, con concentración y depósito consecutivos en la zona de reducción. La mineralización reviste la forma de óxidos de uranio negros ( $\text{UO}_2/\text{UO}_3$ ) y, más raramente, de coffinita. Están casi siempre presentes pirita, galena y fluorita. El molibdeno se halla también en estrecha asociación con el mineral de uranio en cantidades consideradas económicamente viables. Las reservas de mineral de la meseta de Poços de Caldas se estiman en 26 800 t.

### HISTORICAL BACKGROUND

The first indications of radioactivity in the Poços de Caldas plateau date from 1949, but they relate only to the presence of zirconium. In 1952 the presence of uranium associated with zirconium (caldasite) was discovered, and detailed exploration (aerial scintillometry) began at that time. By 1961 a certain amount

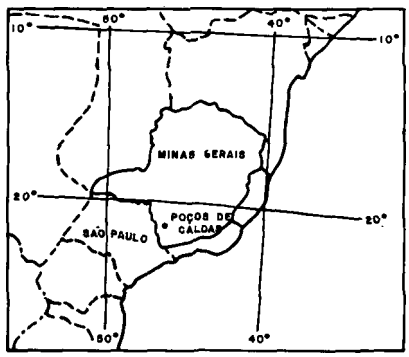
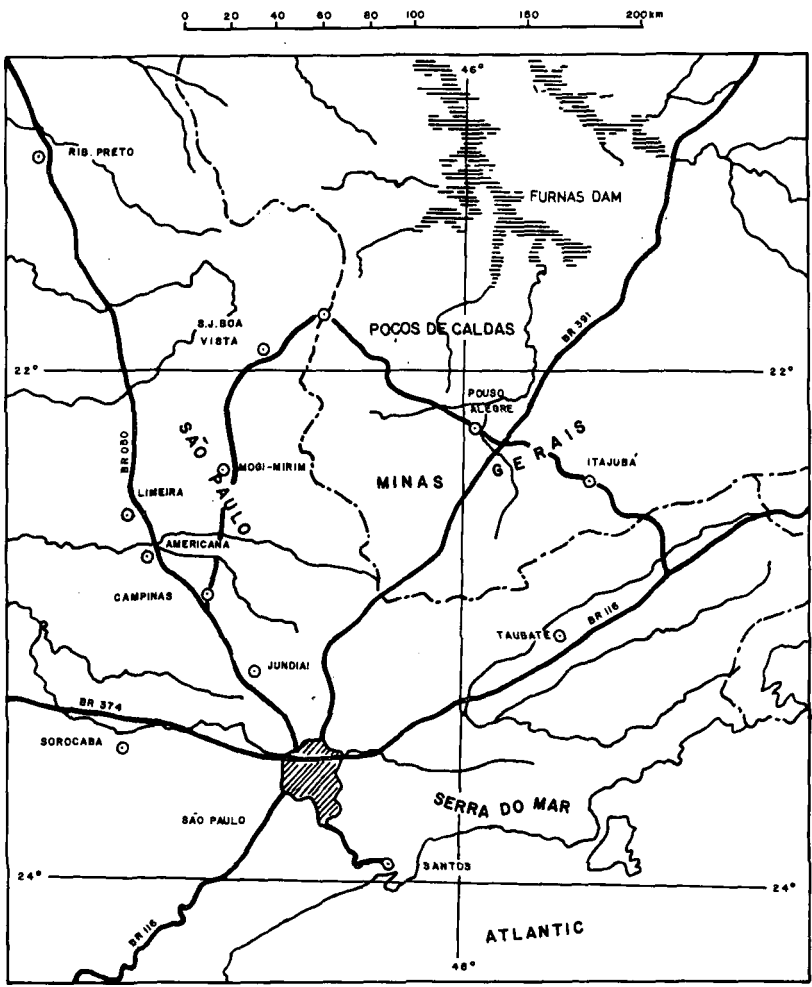


FIG.1. Location and situation maps.

of work had been done, including the opening of several tunnels. Nevertheless, attempts to process the zirconium-bearing ore proved uneconomical, requiring intensified efforts to find more favourable mineralization. As of 1962, prospecting work was stepped up and resulted, in 1972, in the discovery of the Campo do Cercado deposit (C-09), known today as the Osamu Utsumi mine, where uranium occurs only in association with molybdenum; the zirconium having little influence.

## 1. GENERAL GEOLOGY

The Poços de Caldas plateau is located in the southwest of the Minas Gerais state (Fig.1). It is of a collapsed, circular volcanic structure, with a diameter of approximately 30 km (Fig.2), and consists of an alkaline intrusion aged approximately 60 million years (Upper Cretaceous).

The volcanic events affected the granite/gneiss complex of the crystalline basement and the sediments of the Paraná Basin (Mesozoic). The most abundant rocks belong to the nepheline-syenite family and are distributed as follows, in descending order of occurrence: *tinguaite*, *phonolite*, *nepheline-syenites*, *foyaite*, *lujaurite* and *chibnite*. One also finds rocks typical of volcanic ejection, such as tuff, ash, volcanic breccias and welded tuff.

In the central area of the caldera there occur extremely altered rocks of the potash type. In the north we find a concentration of larger outcrops, corresponding to rocks of the *lujaurite* and *chibinite* type. In the northwest there are some Mesozoic sediments and in the southeast granite/gneiss basement rocks, showing intense fenitization.

On the basis of studies made so far, the formation of the Poços de Caldas caldera can be divided into six phases:

- (1) Rising of the basement and sediments through stepped faulting
- (2) A long period of volcanic activity, first slow with laval flow, then explosive with the formation of tuffs and breccias
- (3) Subsidence of the central part of the caldera (accompanied by brecciation, mylonitization and intense tectonic activity)
- (4) Nepheline-type intrusion through radial and circular cracking, represented by phonolites, *tinguaite*s and *foyaite*s
- (5) Formation of the annular dyke
- (6) Intrusion of *lujaurite*, *chibinite* and *foyaite*.

Figure 3 shows a schematic profile of the volcanic events in Poços de Caldas.

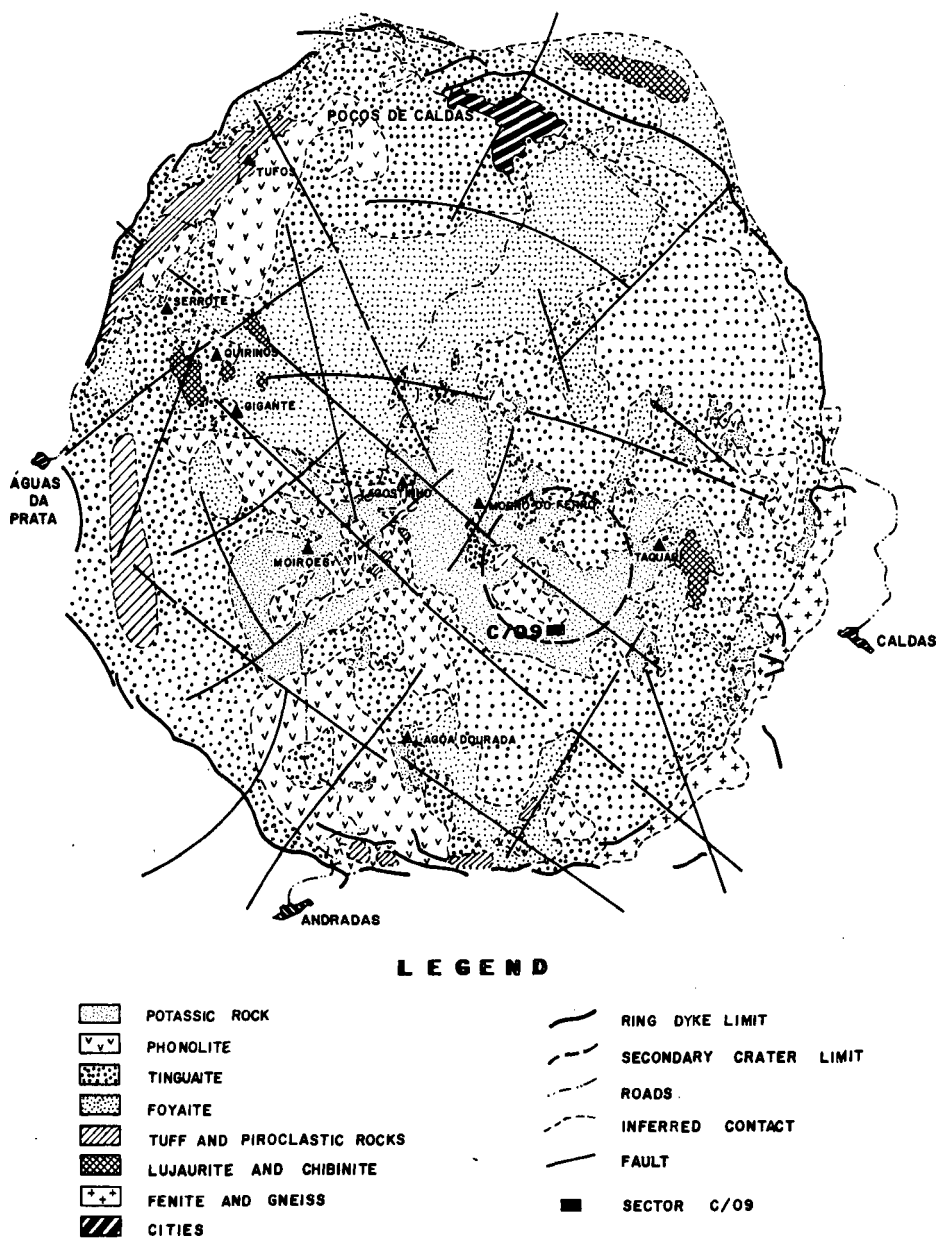


FIG.2. Geological map of Poços de Caldas plateau.

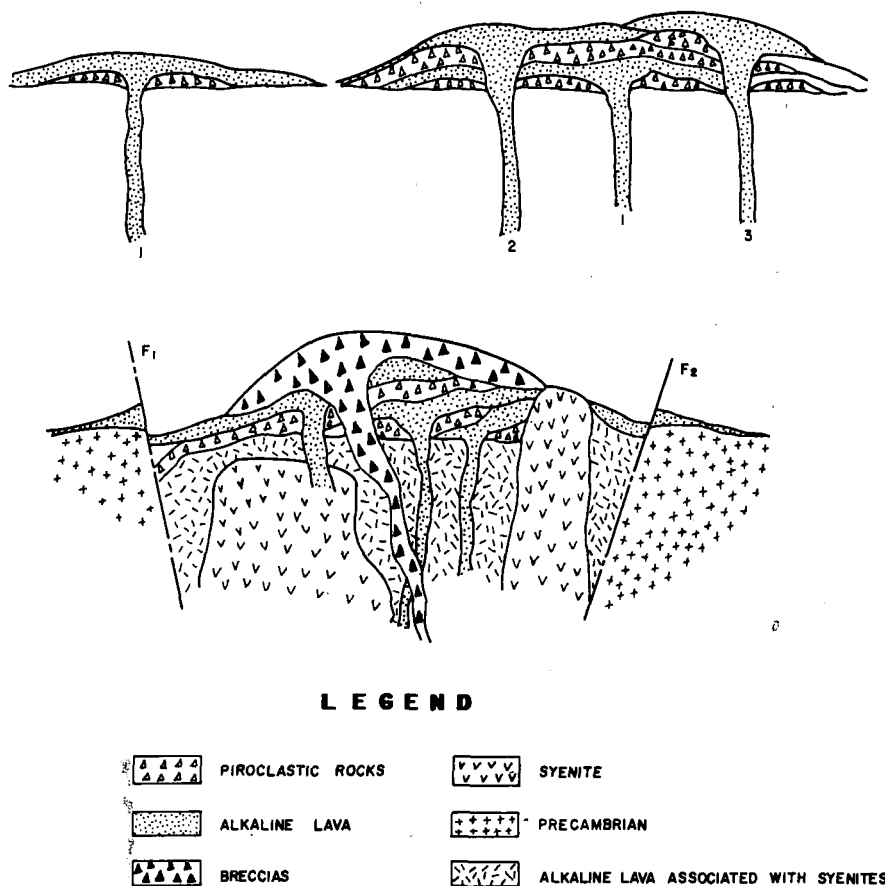
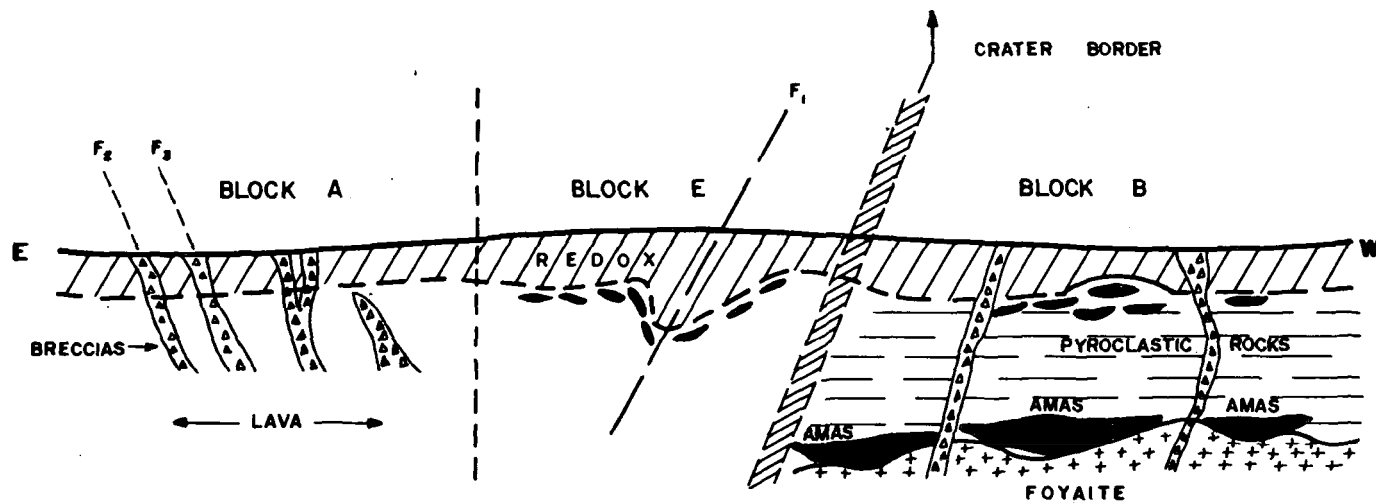


FIG.3. Schematic profile of Poços de Caldas volcanic events. Nos 1-3 represent the sequence of emplacements.

## 2. TECTONICS

The tectonics constitute an important factor in the geology of Poços de Caldas. At the caldera level we find two fault systems in an almost perpendicular position, N60W and N40E, corresponding to the main regional directions associated with the tectonics of the basement, which were reactivated at the time of the volcanic event. At the level of the deposit, we find the regional faults and intense fracturing on local scale running from N10E to N25E.



HORIZONTAL SCALE - 1:5,000

VERTICAL SCALE - 1:10,000

FIG.4. C-09 deposit profile with A, E and B blocks.

### 3. ALTERATION

The climatic conditions (humid, with dry seasons) in the region and the topography of the Poços de Caldas plateau, coupled with the mineralogy of the alkaline rocks, have caused extensive alteration, which attains as much as 200 m in depth at certain points – a fact which always complicates exploration work by reason of the scarcity of outcrops. The alteration has resulted in several clay and bauxite deposits explored in the region.

### 4. GEOLOGY OF THE DEPOSIT

The C-09 deposit is located on the edge of a secondary crater in the south-east of the plateau. It occupies an area of 20 km<sup>2</sup> and is divided into three ore bodies, namely, A, B and E (Fig.4). To delineate these bodies – and bearing in mind the thick, altered mantle and the complexity of the deposits – 320 fully cored boreholes (totalling 114 000 m) were drilled, in addition to digging 2500 m of tunnels at three different levels.

Ore bodies A and E make up a homogeneous lithological unit that is probably part of the emplacement channel and body B is located in the volcanic cone. The presence of three different types of mineralization occupying such a limited area may be explained by the fact that large volcanic regions are special hybrid cases in which the surroundings are low-energy rock that are associated with localized sources of extremely high energy, violent in manifestation and rigid in structure (faults and intrusions), with the resulting formation of horizontalized depositional surroundings (ash and pyroclasts). In one and the same place there are therefore the most diverse types of low-energy 'envelopes', which usually result in mixed deposits with geological conditioning that even varies on the human time-scale.

#### 4.1. Body A

The approximate dimensions are as follows:

- (1) Major axis: (A–A') 800 m (N30W)
- (2) Minor axis: (A''–A''') 520 m (N60E)
- (3) Maximum depth attained (so far): 210 m (Fig.4).

The ore bodies form a homogeneous lithological unit intersected in the north-west part by breccia zones with vertical and sub-vertical attitudes. These bodies lie in the direction NW-SE. The so-called A1 body is the most extensive and although the A2 body is similar it has been less investigated.

There are other ore bodies that have not been clearly delineated, have varying lengths, thicknesses and directions and are associated with a zone of secondary fracturing.

The breccia zones are mineralized and have a very fine matrix, dark in colour, made of fine rock fragments associated with pyrite, uranium and molybdenum. The elements are tinguaitic, showing a crenulated surface, with clearent contacts, suggesting a kind of 'tuffisite-breccia'.

In the northeast region of ore body A, the mineralization appears to be associated with the redox front, the uranium being of the secondary type and probably originating from the leaching of the breccias, which attain surface level and are already in a state of oxidation. The characteristics of this mineralization are identical to those of ore body E.

In the middle, ore body A is intersected by small 'tuffisite-breccia' belts running in various directions, which are probably small apophyses of a volcanic pipe.

The enclosing rock — tinguaitite and phonolite — is mineralized in places, the mineralization, however, stemming from impregnation due to contact with the highly mineralized breccias. This migration appears to have been facilitated by the intense fracturing and high porosity of the rock. The mineralization in body A makes up roughly 20% of the total reserves of the C-09 deposit.

Lithologically speaking, ore body A is chiefly composed of tinguaitite and phonolite, intersected by tabular 'tuffisite-breccia' belts with different attitudes and dimensions. Tables I and II show some of the rocks from body A with their mineralogy and chemical composition.

#### 4.2. Body E

The approximate dimensions are as follows:

- (1) Major axis (E-E') 1040 m (N54E)
- (2) Minor axis (E''-E''') 410 m (N36W)
- (3) Maximum depth attained: 128 m (Fig.4).

In this body the mineralization is completely secondary and is characterized by a high degree of variation in the shape and type of the metal-bearing concentration within one and the same set of lithological conditions; there are three types of mineralization in all. One type occurs in the uppermost area, which is altered and oxidized to a depth of roughly 120 m, most of it being concentrated in the first 10 m. The uranium is probably adsorbed to limonites. The other two (more important) types occur in the zone delineated above by the oxidation front and below by the alteration front.

The hydrolysis of the alkaline rocks is a progressive phenomenon in the C-09 deposit and extends from 150 to 200 m in depth, where the topography

TABLE I. MINERALOGY OF SOME A BLOCK SAMPLES

Number of the samples	Depth of sampling (m)	Name of the rock	Mineralogy (decreasing abundance order)
SC 37-02	5.00	Phonolite	Alkaline feldspar
			Aegirine
			Aegirine – Augite
			Altered nepheline
			Sericite
			Opaque
			Carbonate
			Fluorite
SC 48-02	124.85	Trachyte phonolyte (altered)	Clay minerals
			Alkaline feldspar
			Sericite
			Altered nepheline
			Carbonate
			Analcime
			Iron oxides
			Fluorite
SC 60-02	70.70	Brecciated trachite tuff	Apatite
			Clay minerals
			Alkaline feldspar
			Sericite
			Opaque
			Fluorite
			Carbonate
			Sodalite and/or
			Analcime
			Iron oxides
			Clay minerals

TABLE II. CHEMICAL COMPOSITION OF SOME A BLOCK SAMPLES

% Chemical composition	Number of the sample	Depth of sampling (m)	
		5.00	70.50
		SC 37-02	SC 60-02 A
SiO <sub>2</sub>		52.9	54.8
K <sub>2</sub> O		13.45	10.0
Na <sub>2</sub> O		2.30	0.10
CaO		1.78	2.94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		16.4	17.0
MgO		<0.07	<0.07
TiO <sub>2</sub>		0.26	0.43
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0.05	0.16
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>		<0.01	<0.1
FeO		5.90	0.04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		6.4	7.1

permits deeper circulation of the groundwater in the fractured zones. The intense fracturing running northeast is a factor that has contributed to the increased concentration of the uranium mineralization in ore body E (nodule formation).

Some of the uranium ores (black oxides) are unstable under humid oxidizing conditions and cannot exist above the oxidation front. As the oxidation front advances, the pyrite is destroyed, the iron and sulphur being mobilized, and then precipitated anew as pyrite, immediately below the front. The result is a pyrite concentration related to the advance of the oxidation. Uranium oxide ores migrate with the pyrite and are precipitated alongside the previously existing or new pyrite.

The bodies associated with the redox zone take various forms (strata, parallelepipeds, prisms, dihedra and apophyses) arranged differently according to the migration of the oxidation front and the influence of the tectonics (Fig.5).

The tunnelling operations cut through both narrow, sub-vertical zones and irregular pockets, describing an 'amas' (rich ore) area. This area appears to be conditioned by the degree of alteration of the rock, probably as a consequence of gumarole action and the effect of hydrothermal solutions.

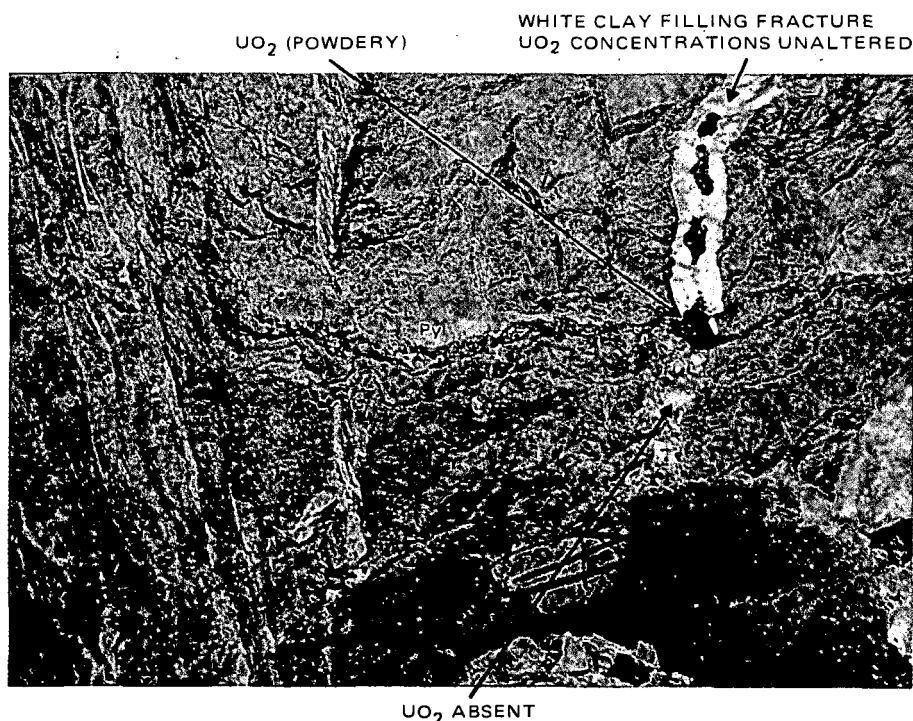


FIG.5. Tectonically controlled oxidation zone of ore body E.

The mineralizing solutions were remobilized and deposited preferentially in the areas where there is crossing of the faults (perpendicular systems) or in the fault planes NE-SW, forming nodular patterns with high  $U_3O_8$  concentration. These nodules vary from 1 cm or less in diameter to 10 cm in the major axis, and 1 to 8 cm in the minor axis. The middle of these nodules is usually made of clay and black oxides, while the outside is composed of pitchblende and pyrite (Fig.6).

As a whole, the mineralization of body E is arranged predominantly sub-horizontally, with a slight dip towards the NE. It makes up roughly 15% of the reserves of the C-09 deposit. From the lithological standpoint, body E is homogeneous and is made up of fairly altered and fractured tinguaitite and phonolite. It is in abrupt, probably tectonic, contact with body B to the SE. Tables III and IV show some of the rocks in body E, with their mineralogical characteristics and chemical composition.

## BUCKSHOT NODULES

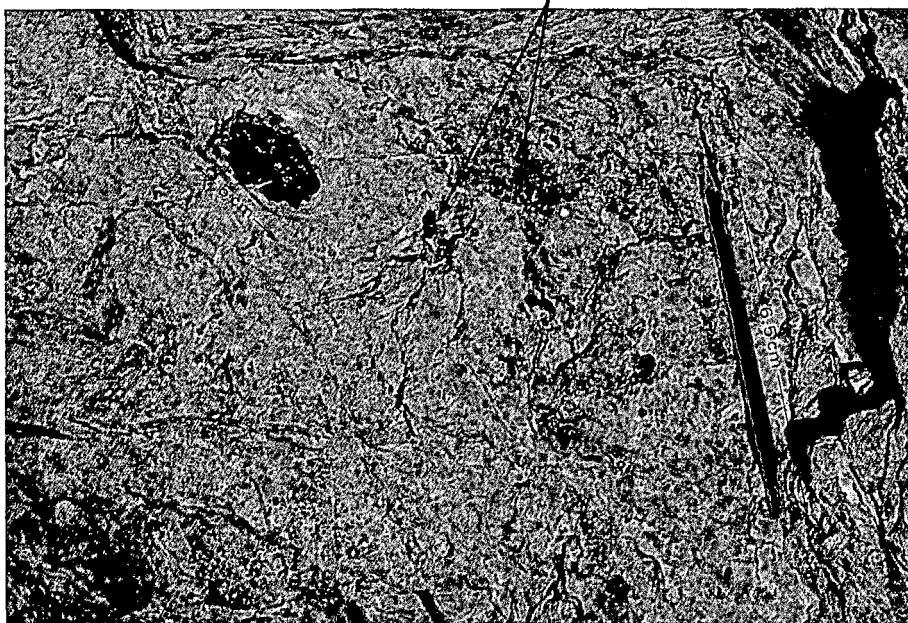


FIG. 6. Pitchblende nodules, pyrite and clay minerals in ore body E.

#### 4.3. Body B

The approximate dimensions are as follows:

- (1) Major axis: (B-B') 1420 m (N42E)
- (2) Minor axis: (B''-B''') 440 m (N48W)
- (3) Maximum depth attained (crest of the foyaite intrusion): 368 m (Fig. 4).

Body B is considered to be an accumulation of pyroclastites in a depression with foyaite composition, where there is alternation of at least 10 volcanic facies, intersected by alkaline intrusive formations.

The mineralization will be treated as the primary type, for the purpose of differentiating it from another clearly secondary type, and is limited in depth to the surface of the foyaite rock. Laterally, this mineralization follows the topography of this surface, with a tendency to level out the irregularities, and thickens considerably in the depressed regions, terminating abruptly at the edges of the basin. The homogeneity of the hydrothermal alteration is suggestive more

TABLE III. MINERALOGY OF SOME E BLOCK SAMPLES

Number of the samples	Depth of sampling (m)	Name of the rock	Mineralogy (decreasing abundance order)
SC.03.03 C	47.60	Phonolite	Alkaline feldspar Nepheline Sericitic Opaque Epidote Fluorite
SC.07.03 C	35.80	Tinguaite	Alkaline feldspar Altered nepheline Aegirine — Augite Opaque Carbonate Iron oxides
SC.07.03 K	113.30	Tinguaite (altered)	Alkaline feldspar Sericitic Nepheline Carbonate Opaque Fluorite Iron oxides
SC.47.01	138.50	Nepheline syenite	Alkaline feldspar Nepheline Sericitic Opaque Epidote

TABLE IV. CHEMICAL COMPOSITION OF SOME E BLOCK SAMPLES

<div> <div></div> <div>Number of the sample</div> <div>% Chemical composition</div> </div>	Depth of sampling (m)		
	35.8	113.30	138.50
	SC.07.03 C	SC.07.03 K	SC.47.01
SiO <sub>2</sub>	52.0	51.5	57.7
K <sub>2</sub> O	12.0	11.1	9.2
Na <sub>2</sub> O	1.95	0.85	0.25
CaO	1.26	3.08	<0.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.7	20.7	22.5
MgO	<0.07	<0.07	<0.07
TiO <sub>2</sub>	0.25	0.25	0.28
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08	0.06	0.03
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	<0.01	<0.01	<0.01
FeO	2.57	0.88	0.18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.56	5.78	4.23

of a lateral migration than of migration through structural channels. The structures seem to be of secondary influence and are responsible for greater enrichment. There is an increase in the average uranium contents as one approaches the foyaite rock, whereas the zirconium contents do not change. Furthermore, the mineralized layers increase with depth, thereby supporting the assumption that the main factor in geological control is the foyaite/pyroclastic rock contact. Tables V and VI show some of the rocks in body B, with their mineralogical characteristics and chemical composition.

#### 4.4. Mineralogical composition and type of deposit

Metallographic studies and diffraction analyses made so far have enabled the mineralogical composition of the different bodies to be described, as shown in Figs 7 and 8. The metal ore and gangue associations, together with the normal altered ores, enable the C-09 deposit to be classed as hydrothermal of the meso-thermal type.

TABLE V. MINERALOGY OF SOME B BLOCK SAMPLES

Number of the samples	Depth of sampling (m)	Name of the rock	Mineralogy (decreasing abundance order)
SC 13-02 A	89.70	Trachyte	Alkaline feldspar
			Sericite
			Carbonate
			Zoisite
			Titanite
			Leucoxene
			Clay minerals
			Fluorite
			Opaque
			Zincon
SC 13-02 C	107.55	Alkaline breccia (altered)	Alkaline feldspar
			Sericite
			Clay minerals
			Epidote
			Opaque
			Fluorite
			Carbonate
			Zincon
			Sodalite and/or Analcime
SC 13-02 D	109.00	Nepheline syenite (altered)	Alkaline feldspar
			Sericite
			Nepheline
			Clay minerals
			Carbonate
			Fluorite
			Opaque
			Iron oxides
			Epidote

TABLE VI. CHEMICAL COMPOSITION OF SOME B BLOCK SAMPLES

<div> <div></div> <div>Number of the sample</div> <div>% Chemical composition</div> </div>	Depth of sampling (m)	
	97.70	109.00
	SC 13-02 B (nepheline syenite)	SC 13-02 D
SiO <sub>2</sub>	50.3	50.8
K <sub>2</sub> O	11.0	12.0
Na <sub>2</sub> O	0.20	0.50
CaO	2.76	3.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.2	21.7
MgO	<0.07	<0.07
TiO <sub>2</sub>	0.48	0.29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	0.07
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0.02	0.07
FeO	2.23	2.16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.9	3.2

## 5. DEVELOPMENT OF THE MINE

The ore bodies will have to be mined by opencast and underground methods. The planned pit will be 300 m deep, with a maximum diameter of approximately 1000 m. The total volume to be mobilized is of the order of  $90 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

A Brazilian company has been contracted to remove the overburden (exposure of the mineralized bodies). By the end of March 1978, i.e. while the first contract was in force,  $2.8 \times 10^6 \text{ m}^3$  of overburden had been removed, and a second contract started in May 1978 will enable the removal of  $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$  of overburden; this contract is due to expire in April 1979. A third contract will have to begin at that date, which is when the planned ore mining operations will commence.

The schedule for the structural development of the pit provides for benches 16 m high in the overburden bands and 8 m, 4 m, 2 m and 1 m in the ore, depending on the shape and size of the mineralized zones or bodies. An average angle of  $45^\circ$  will be permissible for the final slope of the pit.

METALLIC MINERALS BLOCKS	PYRITE	GALENA	BLENDE	PITCHBLEND	PANPYTOBLEND	U <sup>238</sup> MINERALS	COPPERITE	MAGNETITE	HEMATITE	CALCOPYRITE	ILSEMANNITE	VOEDISITE	ILMENITE	SPINEL AND LEUCOSPINE
A	●	◐	○	●	○	○	◐	○	○	○	●	◐	○	○
E	●	●	●	●	●	●	◐	○	○	○	●	◐	○	○
B	●	●	◐	●	○	●	◐	◐	◐	◐	○	○	◐	●

- DETECTED PRESENCE  
 ◐ VERY LOW QUANTITY OR UNDETECTED PRESENCE  
 ◑ OCCURRENCE NOT ASSOCIATED WITH URANIFEROUS MINERALIZATION  
 ○ UNDETECTED

FIG.7. Main metallic metals.

GANGUE AND ALTERATION MINERALS BLOCKS	FLUORITE	CARBONATES	SERICITE	KAOLINITE GROUP
A	●	○	●	●
E	●	●	●	●
B	●	●	●	●

- DETECTED PRESENCE  
 ○ UNDETECTED

FIG.8. Main gangue and alteration minerals.

It is planned to use the mine to supply an ore beneficiation plant with a rated output of the order of 550 t/a of  $U_3O_8$ , in the form of yellow cake (ammonium diuranate), for 10 or 12 years. The rate of supply of the plant will range from 2.0 to 5.0 t/d, according to the ore content. An area with a capacity suitable for stockpiling 300 t has been provided to ensure a regulated supply of ore for the plant during the production period. This area is located near the mine between the primary and secondary crushing plant and the grinding unit. An ore pipeline two kilometres long will permit the pulp to be pumped from the grinding unit to the beneficiation plant.

## 6. GEOLOGICAL CONTROL

### 6.1. Objectives and aims

In view of the high complexity of the uranium deposit in Sector C-09, plans for rigid and systematic geological control will be carried out concurrently with the mining development of the sector to provide the amount of information required for the proper completion of the mining and beneficiation operations.

Basically, the work to be done under the geological control programme will cover the following areas:

- (a) Control of exploration, based on geological and mineralogical studies of the deposit
- (b) Assistance and support for the planning of the mining operations, which will provide improved guidelines for the conduct of the latter
- (c) Provision of geological and physico-chemical data to assist development in the ore treatment area
- (d) Survey of probable changes in the estimates of the ore reserves
- (e) Technical assistance with any other plans for activities such as the building of roads and dams, testing of bank stability, etc.

### 6.2. Implementation

To acquire the necessary data the following operational phases will be implemented.

#### 6.2.1. *Localization of the ore bodies*

This will be based on interpretation of the vertical cross-sections worked out from the already completed and future drilling programmes, and on the ore maps drawn up by the Krig method. Thus, an overall idea of the form, spatial position and grade of the ore in the mineralizations will be obtained.

### 6.2.2. *Test drilling and drilling accompanying mining operations*

- (a) **Test drilling:** To systematize the drilling operations use will be made of a grid with 40 m intervals, covering the whole of the sector. With a view to supplementing the computer-aided ore maps, drilling at the grid nodes will be carried out, at distances of 60 m, with recovery of all the drill cores, thus enabling the areas of overburden localized between the mineralized blocks to be evaluated.
- (b) **Drilling to accompany operations:** To accompany the mining operations there are plans for detailed drilling on a scale yet to be determined, with minimum spacing of 5 m. In view of the radiometric disequilibrium recorded at the deposit, it will be possible to sample and chemically analyse (X-ray fluorescence method) this borehole. The data obtained from these drillings will provide the exact distribution of the ore inside each block being worked, thereby preventing dilution losses and promoting improved planning of the mining operations.

### 6.2.3. *Radiometric monitoring*

In addition to the chemical data obtained from analysis of the drill cores and surface samples, there will be radiometric monitoring directly above the test, control and extraction boreholes. Systematic monitoring plans have been drawn up for all the intersected areas on a square grid with 2.5 m intervals. The loads to be sent to the crushing plants and storage areas will be monitored through a sorting gate, which will also provide the radiometric and chemical data required for its systematic calibration. The monitoring will be carried out for the most part with various instruments of domestic manufacture.

Figure 9 describes the sequence of geological control and the operational flowsheet for the mining of C-09.

### 6.2.4. *Lithological control*

The nature of the information obtained from opencast mining depends on the complexity of the deposit. In a complex structure, the greater the amount of data, the better and more accurate the conclusions to be drawn regarding the behaviour of the ore. These data should reflect the gradual change in the shape and distribution of the ore bodies in the blocks. Acquisition of the data will result in detailed litho-structural and systematic mapping of all the slopes and berms exposed during the useful life of the mine.

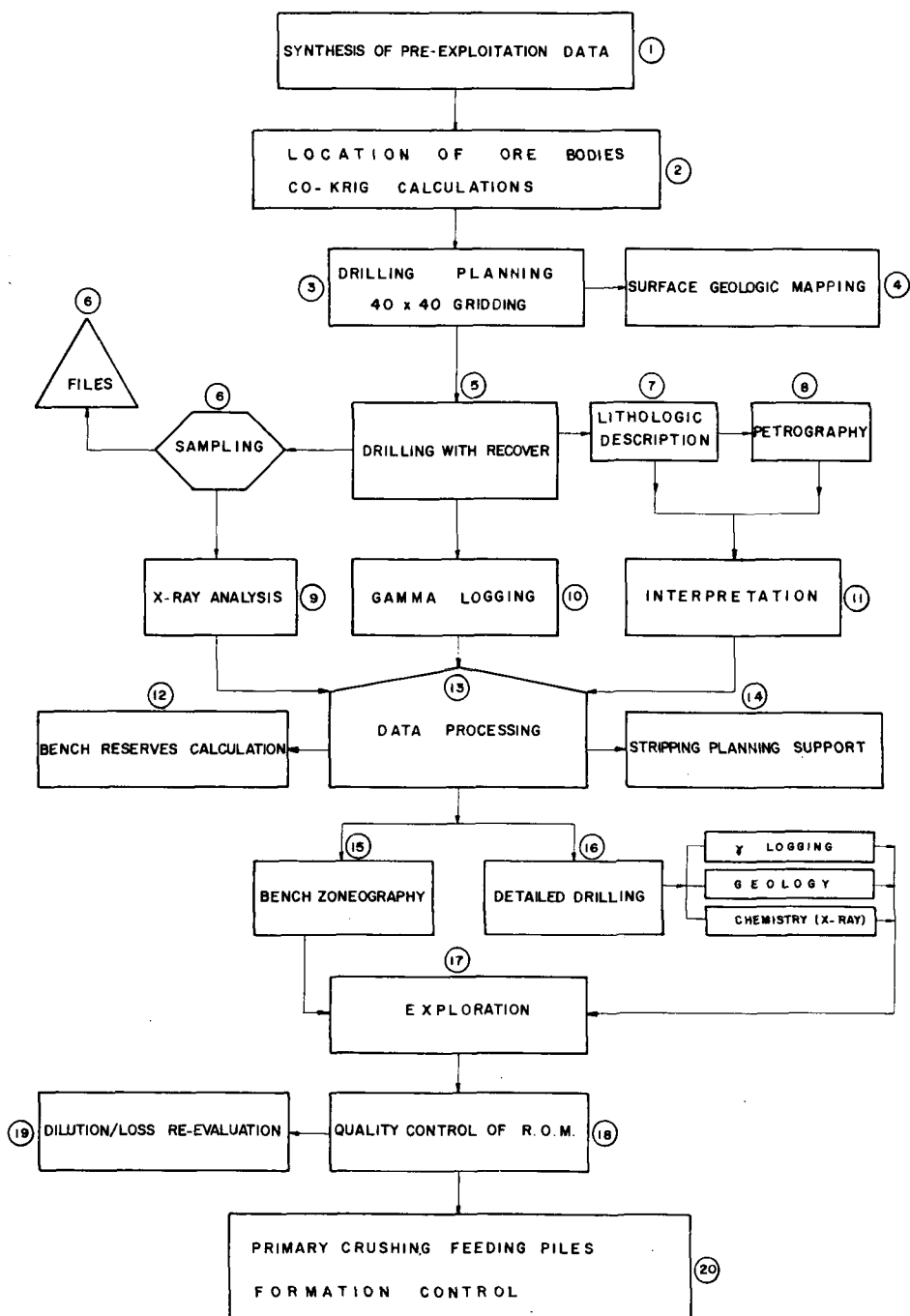


FIG.9. Geological control operation sheet.

#### *6.2.5. Zoning of the benches and cuts*

The set of data obtained through implementation of the programme described above will be properly card-indexed and sent to the computer centre for processing and for the compilation of horizontal and vertical zoning of the whole mine. The entire data processing work is to be carried out by the mine's computer centre, which is equipped with a domestically manufactured computer.

#### *6.2.6. Conclusions*

The final analysis of the whole range of information should provide the data required to correct the general conception of the form of the deposit and the localization of new and potentially fertile areas. It will also be used for tonnage correction and to check the probable causes of loss and/or dilution, thereby ensuring that the mine develops the desired safety and reliability.

### **ACKNOWLEDGEMENTS**

The author wishes to thank the geologists of the Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) and NUCLEBRAS (DRM and DIN) who worked at Poços de Caldas for the information and assistance received.

### **DISCUSSION**

D.L. CURRY: In the USA several possible caldera environments have been identified in the Great Basin. The McDermott caldera of northern Nevada most clearly fits a caldera model. A paper by F.G. Files of the Department of Energy and Grand Junction, Colorado, represents a summary of the content of papers published recently by various entities, including USGS, university professors, etc. The paper, entitled "Uranium in volcanic environments in the Great Basin", Open-File Report GDBX-98(78), can be acquired through the Bendix Field Engineering Corp., Technical Library, P.O. Box 2567, Grand Junction, Colorado, USA 71501.



# PHOSPHORO-URANIFEROUS MINERALIZATION ASSOCIATED WITH SODIUM EPISYENITES IN THE CEARA PRECAMBRIAN (BRAZIL)

A.G. ANGEIRAS, A.M. NETTO,  
M. DE CAMPOS  
NUCLEBRAS (DRM),  
Rio de Janeiro,  
Brazil

*Presented by J. G. Ayres*

## Abstract-Resumen

### PHOSPHORO-URANIFEROUS MINERALIZATION ASSOCIATED WITH SODIUM EPISYENITES IN THE CEARA PRECAMBRIAN (BRAZIL).

In 1976 NUCLEBRAS began the economic evaluation of phosphoro-uraniferous sub-domains with similar genetic behaviour occurring in different tectonic environments of the northeastern Brazilian Shield, particularly the midwest part of the state of Ceará. The regional extent, the persistence of the genetic aspect and the late tectonic character of the mineralization would appear to define, in northeastern Brazil, a significant metallogenic uraniferous event at the end of the Brazilian Cycle, equivalent in age to the late uraniferous granites of the Pan African Cycle. Mineralization occurs mainly as massive colophonites and as episyenitized granitic apophyses, as well as filling open spaces (fissures, fractures, 'amas', etc.), and by hydrothermal replacement of the country rock (marble, gneisses, and episyenites). Mineralization, derived from granitic intrusions, developed in two phases. The earlier is characterized by desilification, chloritization, albitization and apatitization of the granites originally with an anomalously high uranium content (30 to 40 ppm), resulting in the formation of a vacuolar rock enriched in phosphorous and uranium episyenites (750 ppm). This deuteric-type process probably evolved between 200 to 350°C, in the presence of fluids rich in NaCl, CaCl<sub>2</sub> and B (brines) and low in CO<sub>2</sub> content. The late phase, tele- to epithermal, took place at lower temperatures (50 to 130°C) in the presence of highly saline fluids (22% equivalent CaCl<sub>2</sub>) and low CO<sub>2</sub> content, giving rise to widespread deposition of uranium-rich colophonite (>1500 ppm) and poor thorium (<200 ppm). Fluid convection related to the cooling of granitic plutons appears to be responsible for the mineralization processes.

### MINERALIZACION FOSFORO-URANIFERA ASOCIADA A EPISIENITAS SODICAS EN EL CEARA PRECAMBRICO (BRASIL).

En 1976, NUCLEBRAS empezó la evaluación económica de ambientes fósforo-uraníferos de comportamiento genético análogo existentes en distintos medios tectónicos del escudo noreste brasileño, en particular en la parte central-occidental del Estado de Ceará. La extensión regional, la persistencia del aspecto genético y el carácter tectónico tardío de la mineralización parecerían definir, en el nordeste del Brasil, un importante

fenómeno metalogénico uranífero al final del Ciclo brasileño, de edad equivalente a la de los granitos uraníferos tardíos del Ciclo Panafricano. La mineralización se presenta principalmente en forma de colofanitas masivas y apófisis graníticas episienitizadas, así como de relleno de espacios abiertos (fisuras, fracturas, 'amas', etc.) y de sustitución hidrotérmica en la litología regional (mármoles, gneises y episienitas). La mineralización, procedente de intrusiones graníticas, se desarrolló en dos fases. La primera se caracteriza por la desilicificación, cloritización, albitización y apatización de los granitos con un contenido original de uranio anormalmente alto (30–40 ppm), dando como resultado la formación de una roca vacuolar enriquecida en episienitas fósforo-uraníferas (750 ppm). Este proceso de tipo deutérico probablemente tuvo lugar entre 200–350°C, en presencia de fluidos ricos en NaCl, CaCl<sub>2</sub> y B (salmueras) y con bajo contenido de CO<sub>2</sub>. La última fase, de naturaleza entre tele y epitermal, tuvo lugar a temperaturas más bajas (50–130°C), en presencia de fluidos altamente salinos (22% de equivalente de CaCl<sub>2</sub>) y con bajo contenido de CO<sub>2</sub>, lo que produjo un amplio depósito de colofano rico en uranio (>1500 ppm) y pobre en torio (<200 ppm). La convección de fluidos relacionada con el enfriamiento de los plutones graníticos parece ser el factor causante de los procesos de mineralización.

## INTRODUCTION

Uranium prospecting operations in the Precambrian of the central region of Ceará started in 1975 with the Canindé vehicle-borne radiometry project (NUCLEBRAS/CPRM), which provided, in a first approximation, a regional radiometric distribution (total count) of lithologies. Of the anomalies found under this project, NUCLEBRAS selected 12 for verification. By coincidence, all of them related to a uraniferous mineralization associated with phosphorus in the form of a vacuolar rock without quartz but with a high percentage of albite. This gave rise to the original name of albite-syenite.

In 1976 detailed studies based on radiometric and geological maps began with borehole drilling and trenching at anomalies 25 (Aquiri, Santa Quitéria), 65 (Fazenda Petra Preta) and 66 (Fazenda Esperanca). Anomaly 62 was initially represented by a single boulder near Fazenda Barrigas. Starting from this site several reconnaissance profiles were carried out. This work resulted in the discovery, at about 1.5 km to the north of Fazenda Barrigas, of the Itaitaia deposit, which is the main subject under discussion here.

The same type of mineralization was also identified in four other uranium occurrences.

An apparently similar type of uraniferous mineralization is being evaluated by NUCLAM, a subsidiary of NUCLEBRAS, in Paraíba state, generally confirming the importance of the event for the northeast.

After confirmation of the regional distribution of the mineralization, several projects of general interest were carried out in search of data that would contribute to locating new mineralized areas. At first, photo-geological mapping was performed over about 12 000 km<sup>2</sup> at 1:70 000 scale. In 1977

an airborne gamma-spectrometric/magnetometric survey was carried out over an area of 8000 km<sup>2</sup> with 500-m spacing intervals.

In early 1977 the first genetic hypotheses were proposed for the mineralization and its probable regional emplacements were characterized [1]. On the basis of more than 200 surface samples providing over 4000 analytical data items a detailed petrographic study of anomalies 25 and 62 was carried out. At the same time, studies on fluid inclusions were started at the University of Adelaide, Australia. In May 1978 W.S. Fyfe visited the region and on the basis of available data provided decisive guidance on constructing genetic models.

Multispectral analyses of LANDSAT images by IMAGE 100 of the National Space Research Institute (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (INPE) were performed to obtain characteristic spectral standards associated with mineralization and structural mapping, anomaly 62 serving as the test area. Electrical resistivity and VLF methods were tested successfully in defining collophanite bodies.

In mid-1978 5000 m of core drilling were completed with boreholes to a depth of 200 m; another such drilling project, involving deeper boreholes with a total of 10 000 m, is in progress.

## REGIONAL GEOLOGY

The available data on the metallogenic aspects in more than a score of phosphoro-uraniferous sub-domains show a noticeable persistence of the processes responsible for the mineralization which, apart from an extraordinary regionalization of the phenomena, are repeated at distances of tens and even hundreds of kilometres if the Espinharas domain in Paraíba under study by NUCLAM is considered.

These occurrences appear both in the pre-Brazilian Cycle macrodomains, such as the central massifs of Tamboril-Itapagé and Tauá-Macaoca [2] equivalent to the blocks of Santa Quitéria-Itapagé and Banabuí [3], and in the Rio Curú and Jaguaribe fold belts [2].

In this spatial distribution another general aspect of the mineralization is demonstrated by its total independence from the surrounding local lithologies, gneisses, amphibolitic gneisses, marble, etc., of the suprastructure and from the granitic-migmatitic complexes of the infrastructure.

Two regional aspects are, however, characteristic of the mineralization: (1) its close association with granitic rocks from which it originated by post-magmatic processes, and (2) its proximity to large fault zones (Groiairas, Itatira and Mufumbo, for example) which are superimposed on the pre-existing folds and which control complex compartmentalization in the Precambrian of Ceará (Fig.1).

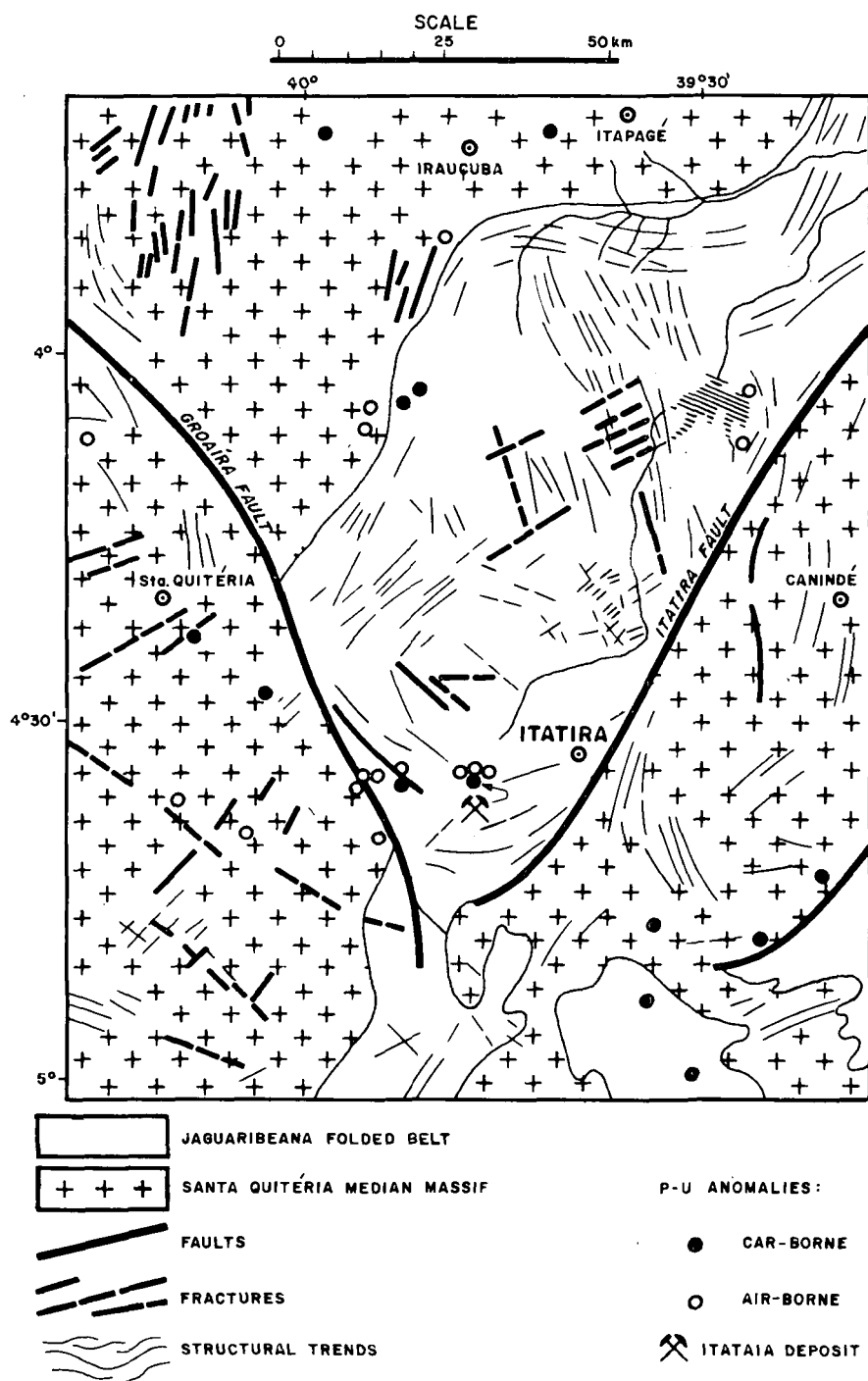


FIG.1. The Precambrian complex of Ceará in the area of the Itataia uranium deposit.

All the known sub-domains are near these faults without, however, being located on them but rather in subsidiary associated tectonic events. These events are of the tension type (generally, forming  $45^\circ$  to  $60^\circ$  angles with the large faults) and appear to have controlled the emplacement of granite stocks, small bodies in the form of domes, and various dykes — most probably late-orogenic in nature ( $500 \pm 10$  million years (m.y.)) — representing one of the final events of the Brazilian Cycle, since the mineralization precedes all the structural features of regional extent. Granite rocks of this age are already known in other regions of the Brazilian platform and exhibit a highly anomalous basic concentration of uranium. By coincidence, the closure of the Pan African Cycle is characterized in Saudi Arabia and in Africa by intrusions of alkaline granitic plugs highly fertile in uranium, and in particular by the large Rössing deposit in Namibia [4].

The various areas already identified by NUCLEBRAS, now at varying stages of study, are clearly associated with granite bodies which underwent long post-magmatic evolution. Owing to the different levels of erosion to which they were subjected, they help to visualize and to understand the phenomena in different zones, indicating the existence of vertical zoning of the mineralizing processes.

The areas located in the Tamboril-Itapagé massif are associated with granite bodies which were mineralized along sub-parallel fractures — N40E — where the granite itself displays a high uranium fertility (30 to 100 ppm) to the south of Santa Quitéria, or with an approximately circular central zone of  $12\,600\text{ m}^2$  (system of orthogonal fractures?) about 12 km to the NE of Taparuaba village, etc.; in the Tauá-Tróia-Macaoca massif some ten anomalies are clearly associated with tension-relief faults between the villages of Mufumbo and Cacimba Nova; in the domain of the Rio Curú-Independência fold belt (in the region of Serra do Machado) the mineralizing processes appear very well developed in all their phases, affecting the whole sequence of lithologies (gneisses, amphibolitic gneisses, marble, etc.) and giving rise to a mineralization model yet unpublished in the vast literature on uranium deposits. It is to this area, known to NUCLEBRAS as anomaly 62 (the Itataia deposit), that a large part of this work is devoted.

## LOCAL GEOLOGY

The Itataia deposit located in the Rio Curú-Independência fold belt [2] is constituted by parametamorphic lithologies of controversial stratigraphic position, although they are assigned to the Caicó group by the Departamento Nacional de Produção Mineral/Compania de Pesquisa de Recursos Minerais (DNPM/CPRM).

Two morphological aspects are distinguishable, namely, a high sector constituted by a hill extruding in the E-W direction comprising predominantly carbonate lithologies and elevations of more than 450 m, and a low-lying sector forming the eastern limits of a valley which opens out to the NW and is limited in the north by the Serra do Céu. The low-lying sector has an eluvial-colluvial cover of thickness varying from 0.5 to 2.5 m which developed mostly on gneissic rocks; its lower elevations (420 m) are to the NW of the area. On the borders between the hill and the low-lying sector there is a thick deposit of talus. These borders are controlled in part by an E-W fault zone, generally indicated by the talus.

To the west the transition between the two morphologies is more gentle because of intercalations of gneisses in marble giving rise to a series of 'steps'.

*Geology:* Detailed geological mapping (1:2500) shows two main regional lithologies, one carbonate (marble and calco-silicates) and the other gneissic (sillimanite-garnet-biotite gneisses and amphibolitic gneisses). In fact the carbonate sequence is part of a large lens (extending over more than 10 km) intercalated and concordant with the gneisses; the lateral passages are common to the two lithologies. These lithologies were metamorphized to high amphibolitic facies.

*Carbonate sequence:* This is constituted by lithologies varying from pure marble to highly impure varieties due to the increased content of micas, pyroxenes, amphiboles, etc. Their colours vary from brown to light grey with subordinated dark types which turn green as they are enriched in tremolite and diopside.

Its fabric varies from a dense, saccharoidal, almost always coarse structure, to types distinguished by a planar structure; in this case they correspond to impure types where sub-parallel arrangement of the [001] planes of phlogopite, and the flakes of graphite, tremolite, etc. define the s-planes constituting the dominant structural element in these rocks.

Although they can also be intercalated in gneisses, the calco-silicate rocks are more frequent in association with marble-forming levels of thickness ranging from a few centimetres up to about 10 m. They are dominated by a planar fabric, and in the outcrops a banded appearance is observed. They are strongly greenish in colour, dense, compact and equigranular, and are composed of quartz, diopside, tremolite, titanite, biotite, scapolite and feldspars.

Examined under the microscope, the most marked features are scapolitization and superimposed late albitization, together with frequent impregnations and substitution by collophanic material.

*Gneiss sequence:* In general it has fine granulation with a well-developed planar fabric defined by alternation of biotite levels with sillimanite and leucocratic, quartz-feldspar levels, the whole being specked with garnet porphyroblasts. Its degree of metamorphism is well adjusted to the high amphibolite facies.

Under the microscope its paragenesis mainly shows microcline, plagioclase, quartz, abundant biotite with associated sillimanite, garnet porphyroblasts and, as accessory minerals, titanite, zircon and some apatite.

In core samples from boreholes near the mineralized zones the gneisses show superimposition of processes related to the interaction of 'direct componental movements' with 'indirect componental movements' [5]. Their fabric is intensely faulted with fully mylonitic levels where fluxion zones can be distinguished. The original paragenesis was completely transformed by total chloritization of garnet and biotite, sericitization of the microcline and filled plagioclase, strong albitization, and the appearance of analcime. This confirms a strong retrograde metamorphism with greenschist facies (very probably with zeolitic facies). In this situation impregnation of collophane mineralization, although scattered, is frequently found, filling fissures and substituting feldspars.

These rocks are interrupted by a large number of granitic and pegmatitic, generally episyenitized, apophyses giving rise on the surface to elongated bodies of linear behaviour, where the length exceeds the width in the ratio of about 10:1. The contact of these rocks with the carbonate rocks formed feldspathized lithologies with their own geochemical characteristics. Several boreholes to depths down to 215 m show that the same pattern persists at depth, i.e. the entire parametamorphic sequence is intensely interrupted by apophyses that were originally granitic and locally pegmatoid (varying in apparent thickness from a few decimetres to 50 to 60 m, representing in this case probable granite domes?). The whole sequence is intensely impregnated with uraniferous collophanite, which also fills the existing voids and substitutes marble and episyenites.

*Collophanite:* The name is here applied to an almost monomineralic, reddish, compact rock with some cavities, generally filled with quartz, which an uninformed observer may confuse with some volcanic rock. The name owes its origin to the characteristic mineralogical constitution of the rock, in which more than 80% correspond to collophane (i.e. 'a crypto-crystalline variety of apatite which may appear isotropic or show only weak birefringence, due to the aggregate polarization effect produced by a mass of superimposed sub-microscopic crystallites' [6]). The other minerals present partly comprise the relict of the original lithologies substituted by phosphate. Thus, the collophanite resulting from the substitution of episyenites contains albite, microcline, chlorite, zircon (malacon) and calcite, while the collophanite originating from marble has calcite, graphite and ankerite.

## STRUCTURAL ASPECTS

The most noteworthy feature of the carbonate and gneissic rocks in the mesoscopic sub-fabric is a family of sub-parallel s-planes with all the

characteristics of an inherital bedding; other planar features have not been identified. They are oriented spatially in the ENE-WSW and NE-SW directions with dips towards S and SE in the southern half of the area and NW-SE in the northern part. The linear elements show a general orientation between  $85^\circ$  and  $120^\circ$  with slopes in this direction of the order of  $5^\circ$  to  $10^\circ$ , and are represented by microfold axes,  $Bs_1$ , sub-parallel arrangements of minerals and quartz boudins.

On the macroscopic scale non-plantar, similar and normal cylindrical folds are identified with a slight slope of their axis towards E or W at angles of  $5^\circ$  to  $10^\circ$ , which are fully concordant with the spatial behaviour of the lineations. The axial surfaces of the folds deduced geometrically from the structural diagrams are sub-vertical (with a dip between  $80^\circ$  and  $85^\circ$  towards the south). Two main faults were located. One, inverted in character, has raised the marble hills over the gneisses in the lower sector. The fault zone has an E-W orientation with a southward dip greater than  $50^\circ$  and extends eastwards to the vicinity of the Lagoa do Mato. It is being fully identified by means of deeper boreholes. The intense mylonitization which affects the gneisses is undoubtedly the result of this main fault. At the SW boundary of the area another almost vertical fault was mapped. It truncates the former and apparently contains a horizontal left-hand component.

## PHOSPHORO-URANIFEROUS MINERALIZATION

The development of the mineralizing processes can be divided into at least four distinct phases that are summarized below as an introduction to a more generalized description.

*First phase:* Intrusion of various granite bodies in which the basic concentration of uranium is high (an average of 30 ppm) and that of  $P_2O_5$  is normal. Probably of late orogenic (400–500 m.y.?) emplacement along zones of stress relief associated with large regional faults. The intrusions themselves gave rise to intense hydraulic fracturing (W.S. Fyfe, private communication). At anomaly 62 they appear as apophyses and dome-shaped bodies, borehole data suggesting the existence of a 'stock' at depth under the metasedimentary sequence.

*Second phase:* Intense late magmatic activity, deuteritic in nature, and generally in several contemporaneous granite sub-domains, both in the infra-structure and the superstructure zones. Development of episyenites through desilicification, albitization, chloritization and apatitization; albitization, analcinitization and chloritization in gneisses which retroact on the greenschist facies (perhaps zeolitic?) and scapolitization in marble. Early phase of

uraniferous deposition associated with apatite and zircon (an average of 750 ppm  $U_3O_8$  and 7.5%  $P_2O_5$ ) in episyenites.

*Third phase:* Deformations on a local scale superimposed not only on the already formed episyenites but also on the surrounding lithologies, creating the main brecciated, mylonitized, etc. fabrics (it is not improbable that para-crystalline deformation occurred even during episyenitization).

*Fourth phase:* Late phase characterized by intense deposition of crypto-crystalline apatite (collophane) which impregnated practically all the pre-existing lithologies rendered highly permeable by the preceding phenomena conducive to the filling of spaces and hydrothermal substitution in carbonate rocks and in episyenites. Appreciable enrichment in uranium and phosphorus (an average higher than 1500 ppm  $U_3O_8$  and 33%  $P_2O_5$ ).

#### **Early phase: episyenitization**

During development of the hydrothermal processes responsible for the mineralization a very characteristic early phase was identified in all the anomalies. This gave rise to a peculiar type of rock without granitic quartz which is more or less vacuolar, generally reddish and corresponding to the type I episyenite of the Massif Central in France [7, 8]. It is also equivalent to the 'sponge rock' of the Cunnamore mine in Canada [9, 10]. Significant uranium deposits are associated with these rocks, which have been identified for the first time in Brazil.

In the granite-episyenite transformation practically all minerals are involved: minerals disappear, new minerals are created, or other minerals remain, retaining marked instability, as will be seen from the descriptions given in the following sub-section.

#### **-Mineralogical behaviour**

*Quartz:* In granite rocks quartz is always anhedral and interstitial with marked undulatory extinction and can show inclusions of oligoclase, rutile, etc. In episyenites it disappears completely giving rise to the characteristic vacuolar appearance. It may reappear late, deposited in vacuoles, as an automorphic mineral with lines of growth and fluid inclusions.

*Microcline:* It is highly characteristic of granites, appearing sub-euhedral to anhedral with well-developed twinning in the clear crystals; when sericitized the twinning becomes obscured. In general microcline appears to be somewhat perthitic. In episyenites it becomes unstable, showing intense development

of perthites ('injection and patch perthites') which almost totally replace it. It is frequently sericitized and surrounded by a fine albitic fringe formed later than the perthites.

*Plagioclase:* In granites it is oligoclase (An 7-11) in rarely clear tabular crystals since they generally exhibit the seed to be more calcic and sericitized surrounded by a clear albitic fringe. Episyenites show a variation in the concentration of oligoclase, although with an appreciable increase in the sodic phase, with contribution from albite and stabilization of the more sodic oligoclase surrounded by an albitic fringe. There appear albite crystals of later formation which are always clear and underformed (oligoclase shows curved twinning lamellae and is frequently fractured). Plagioclase occurs very commonly, filling vacuoles, whether or not associated with chlorite.

*Micas:* Muscovite is present in variable proportions in granites, but generally forming large flakes which are sometimes deformed. Biotite, which always appears with fine tabular flakes showing inclusions of zircon and apatite, already exhibits signs of chloritization and impregnation by haematite. While in episyenites muscovite disappears, biotite is fully chloritized and is probably associated with leucoxene and haematite (by the liberation of  $\text{Fe}^{3+}$  and Ti during its alterations). Zircon and apatite are liberated.

*Accessories:* The granite rocks already display an abnormal percentage of apatite (+ 2%), also containing zircon, either as inclusions in biotite or forming rounded and corroded isolated individual specimens. Episyenite shows a noticeable increase in the content of apatite, which is always euhedral, in pyramidal crystals or hexagonal sections, the same crystal frequently having some clear and some smoky zones of dirty appearance. In the vacuoles apatite precedes albite.

In several samples of episyenite zoolites were identified, including analcime, which can rise to 2%, associated with a sodic amphibole (riebeckite?)

Table I confirms the following variations in the mineralogical composition which developed in the granite episyenite transformation:

- (1) Leaching of granitic quartz emphasizing the vacuolar aspect
- (2) Disappearance of muscovite and chloritization of biotite
- (3) Marked albitization giving rise both to newly formed albite crystals and to pronounced perthitization and substitution of microcline and even oligoclase through desilicification.
- (4) Late deposition of secondary quartz in vacuoles with or without carbonate
- (5) Generalized haematitization from  $\text{Fe}^{3+}$  liberated during chloritization of biotite

TABLE I. MODAL COMPOSITION OF GRANITES AND EPISYENITES

Rocks	Granites		Episyenites		
Samples	1.213	1.204	126	095	120
Minerals	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Perthite	—	—	35	12	42
Microcline	37	37	5	3	5
Oligoclase	26	32	16	43	5
Albite	2	1	9	6	10
Granitic quartz	26	23	—	—	—
Secondary quartz	—	—	3	1	3
Biotite	5	3	—	—	—
Muscovite	2	2	—	—	—
Apatite	2	2	2	10	5
Collophane	—	—	16	9	20
Vacuoles	—	—	14	13	8
Chlorite	—	—	—	3	2
TOTAL	100	100	100	100	100

- (6) Large deposition of apatite preceding albite in vacuoles contemporaneously with the first concentration of uranium (400 to 500 ppm of U in total rock and 1430 ppm in apatite crystals in samples from anomaly 25 not affected by the late phase)
- (7) The presence of collophane in the mode analyses of episyenites in Table I already points to superimposition of the late phase on episyenites, for it is very difficult to find episyenites at anomaly 62 without the effects of the late phase.

### Development of the process

Leaching of quartz, which occurs initially, is of fundamental importance. By desilicifying granite, it provides the necessary silica to the other reactions [8]. Under supercritical conditions quartz is the least stable of the granite minerals.

The possibility of paracrystalline deformation superimposed on episyenites suggests that localized tectonic stresses played an important part in the process of quartz leaching; deformation synchronous with desilicification [7] has also been described in the Massif Central in France.

TABLE II. TOTAL ROCK ANALYSIS

	Collophanite I	Collophanite II	Collophanized episyenite	Breccia	Episyenite	Granitic rock
No. of samples analysed						
Element	2	6	5	2	7	4
SiO <sub>2</sub>	25.80	9.20	47.52	47.50	56.39	73.98
TiO <sub>2</sub>	0.55	0.08	0.28	0.44	0.14	0.24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.50	2.11	13.98	12.35	16.73	13.70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.27	1.96	1.39	1.09	3.02	1.06
FeO	1.29	0.31	0.40	0.23	0.41	1.39
CaO	25.60	47.10	13.60	16.30	8.06	1.03
MgO	1.73	0.10	0.66	0.13	0.42	0.46
Na <sub>2</sub> O	2.94	0.27	6.99	6.08	6.07	5.30
K <sub>2</sub> O	0.50	0.15	0.43	0.38	0.76	1.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	29.35	36.60	12.59	11.65	6.54	0.76
CO <sub>2</sub>	0.24	0.34	0.74	1.62	0.15	0.11
MnO	0.20	0.04	0.05	0.07	0.07	0.12
SO <sub>2</sub>	0.19	n.d.	0.11	n.d.	n.d.	n.d.
RF	1.33	1.55	1.99	3.15	1.18	0.84
TOTAL	100.49	99.81	100.73	100.99	99.92	100.01
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0.114	0.174	0.113	0.140	0.077	0.003
ThO <sub>2</sub>	<0.01	0.020	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

As regards equilibrium between feldspars, it should be pointed out that the reactions considered to be the most important in the control of the transformations which these minerals have undergone are:

- (a) Albitization of plagioclase
- (b) Destabilization of the Na/K feldspar with the formation of perthites
- (c) Equilibrium between alkaline and fluid feldspars rich in Na and K.

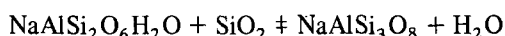
Leroy's studies [8] on fluid inclusions of primary or secondary quartz in the type 1 episyenites of the Saint-Sylvestre massif provide important data for understanding the physical chemistry of the process:

- (1) At the beginning of episyenitization fluids with about 11% equivalent of NaCl predominated, while at the end of the process the concentration fell to 7.8% (secondary quartz, in geodes)
- (2) Low concentration of CO<sub>2</sub>
- (3) Temperature between 350 and 400°C and pressure between 600 and 1100 bar (1 bar = 1.00 × 10<sup>5</sup> Pa).

These values are in agreement with those obtained by Leroy and Poty [11] in episyenites with little albitization, i.e. fluids consisting of 94 mol% H<sub>2</sub>O, 3 mol% CO<sub>2</sub> and 3 mol% equivalent NaCl at temperatures of 380°C and a pressure of 700 bar. The low NaCl concentration is the cause of the incipient albitization because this salt is the main source supplying Na to the process.

Although such data are not yet available on the Itataia episyenites, appreciably higher Na<sub>2</sub>O concentrations (Table II) than at Saint-Sylvestre suggest that the active fluids had a much higher NaCl concentration than those mentioned in item (1) above. Since the transformations are identical, the initial temperatures should be of the same order. Furthermore, the Itataia rocks contain a critical mineral for the thermometry of the phenomena. It is analcime, which paragenetically clearly belongs to the final phase of the process and can therefore be used for defining the final episyenitization temperatures at Itataia.

The reaction



takes place at about 200 to 250°C and at pressures compatible with those mentioned earlier.

The presence of chlorite, the stability of feldspars and also the disappearance of quartz indicate that the fluids had a pH varying from neutral to slightly alkaline, which was favourable to apatite deposition.

TABLE III. TRACE ELEMENTS

	Collophanite	Episyenite	Breccia	Granite	Marble	Calco-silicate rock	Gneiss	Feldspathic carbonatic rock
No. of samples analysed	24	35	11	3	8	10	13	8
Element	24	35	11	3	8	10	13	8
Ag	—	0.21	0.27	—	—	—	—	2
B	—	25	18	33	—	24	21	15
Ba	117	155	81	217	143	166	369	175
Be	1	2	2	2	—	2	2	2
Co	5	6	11	—	—	15	32	24
Cr	37	23	56	12	38	89	150	130
Cu	10	16	8	—	5	18	45	35
Ma	51	48	58	7	14	21	64	41
Mo	—	1.5	4	—	13	—	44	138
Mn	550	216	146	100	480	1040	479	504
Nb	—	—	—	—	—	—	—	—
Ni	13	14	39	—	11	31	62	121
Pb	118	171	113	20	35	53	61	670
Sc	11	3	7	—	15	11	16	10

TABLE III (cont.)

	Collophanite	Episyenite	Breccia	Granite	Marble	Calco-silicate rock	Gneiss	Feldspathic carbonatic rock
No. of samples analysed								
Element	24	35	11	3	8	10	13	8
Sr	3790	1763	2091	733	2000	860	1319	2500
V	42	18	26	15	54	53	102	100
Y	396	145	196	—	36	34	34	49
Zn	—	—	—	—	—	—	146	912
Zr	93	283	690	40	59	88	259	700
RE <sup>a</sup> (%)	<0.01	<0.01	<0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1570	750	1260	30	450	116	54	410
ThO <sub>2</sub>	162	113	111	<100	<100	<100	<100	<100
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	33.10	7.52	14.12	0.67	5.18	2.54	0.83	4.27
U/Th	9.7	6.6	11.4	>0.30	>4.5	1.16	0.54	>4.10

<sup>a</sup> Sn, Nd, Ce, Pr — NUCLEBRAS/CDTN (Centro de Desenvolvimento Tecnologia Nuclear).

— Below sensitivity.

All values in ppm except when indicated.

Oxidizing conditions are well marked by haematite development. Comparison of the various lithologies (Table II), except collophanites, shows that total iron remains essentially constant, although a large part of  $\text{Fe}^{2+}$  is oxidized to  $\text{Fe}^{3+}$  (present as haematite). It is very probable that the reduction of  $\text{U}^{6+}$  to  $\text{U}^{4+}$  by the oxidation of  $\text{Fe}^{2+}$  plays an important role in the precipitation of uranium together with apatite.

The early uraniferous mineralization is demonstrably associated with apatite, as is shown not only by the increase in the average  $\text{U}_3\text{O}_8$  content accompanying the increase in  $\text{P}_2\text{O}_5$  (see Table II), but also by the results of microprobe studies, fission tracks and X-rays. A significant fact in this regard is that no primary or secondary uranium minerals have so far been found.

With the exception of Sr, Zr and Pb and, to a lesser extent, Ag, Mo and La, there are no significant variations in the trace elements in the granite episyenite transformation (Table III).

### Late phase: collophanitization

From the metallogenetic standpoint it is undoubtedly the most important phase, not only because of the deposition of a large quantity of almost pure collophane (above 80%) but especially because of the unusually high contemporaneous concentration of uranium.

Although this phase has already been identified at Itapagé (anomaly 52) and Caçimba Nova, apparently to a lesser extent, it is at Itataia that, according to available information, the phase appears in a most spectacular and original manner.

There are still doubts whether post-crystalline tectonic dislocations supervened between the early phase and the beginning of the late phase (despite strong evidence of para-crystalline manifestations related to the early phase). A time-space definition of these dislocations is difficult precisely because of the superimposition of the late phase masking many pre-existing features; it is not improbable for two deformations to be present.

In some way these deformations gave rise to specific sub-fabrics in episyenites, such as the development of breccias, s-episyenites, mylonitized episyenites, and also involved gneisses and marble. This deformation (or these deformations if more than one occurred) is important in that it opens up spaces, increasing the porosity of the rocks and thereby decisively promoting percolation of the late mineralizing fluids.

The intense generalized impregnation observed at the surface (outcrops, boreholes and trenches) is impressive in core samples, where practically all the lithologies are randomly interrupted by the uraniferous collophane on all scales, i.e. from points and millimetre films of reddish colour to massive collophanite bodies of thickness above 10 m. In undeformed episyenites collophane

fills up all vacuoles and intergranular spaces; it is also scattered along the s-planes and forms the matrix in the tectonized sub-fabrics. Similarly, the same aspects are observed in marble, calco-silicate rocks and gneisses, where features varying from the 'stockwork' to 'cluster' ('amas') type are frequent. Furthermore, it appears through substitution processes, which are as yet little known, on perthitic microcline and oligoclase (albite is not affected) in the episyenites and in calcite in marble. In gneisses the substitution seems to be restricted to feldspar levels.

Chemical analyses accurately indicate what original rocks gave rise to collophanite by substitution. Comparison of the analyses of collophanite I (original rock: episyenites) with those of collophanite II (original rock: marble) in Table II shows that the behaviour of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  and total iron is decisive. This is further confirmed by the higher  $\text{U}_3\text{O}_8$  and  $\text{P}_2\text{O}_5$  values in the second type.

The studies on fluid inclusions, still in progress, show the first important parameters needed for a better understanding of the processes which prevailed during the late phase in anomaly 62.

Fluid inclusions were examined at first in minerals correlated with the late phase — newly formed apatite in episyenite vacuoles, quartz in cavities in collophanite and ankerite in collophanized breccia of episyenite at a depth of 144 m. All basically show the presence of fluids of similar composition. From a combination of cryometric and scanning electron microscope studies, Fuzikawa [12] concluded that the mineralizing fluids were saline solutions rich in chlorides, chiefly  $\text{CaCl}_2$ . The main results are summarized in Table IV.

Considering the probable position of the minerals studied in the preliminary paragenetic sequence of anomaly 62, Fuzikawa's observation seems to be pertinent — that in the apatites of episyenite the inclusions surround fluids with a much higher salt concentration (19.5 to 22.5% equivalent of  $\text{CaCl}_2$ ) than in those of quartz (one of the last minerals to be deposited), which are much more dilute. This indicates a decrease in the salinity of the fluids during deposition of the last minerals. Conversely, the ankerite (preceding apatite) had inclusions with fluids of much higher salinity, to the extent that it did not freeze even at a temperature of  $-196^\circ\text{C}$ . The  $\text{CO}_2$  content seems to be very low, suggesting deposition at low pressure. Furthermore, attempts to freeze solutions supersaturated with  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{NaCl}$  showed an uncommon resistance to solidification [13]. The same phenomenon was also observed in fluids saturated with  $\text{CaCl}_2$  in quartz inclusions from the uranium deposits at Jabiluka [14] and Nabarlek.

Deposition (by substitution or filling) of uranium-bearing collophane is more intense in marble although strong impregnation occurs also in gneisses and episyenites. Marble undoubtedly had an important topochemical function, causing an increase in the fluid pH with consequent deposition of phosphate.

TABLE IV. FLUID INCLUSION IN THE ITATAIA ORES

Rock	Mineral	Inclusion	tf (°C)	ts (°C)	th (°C)	Equivalent CaCl <sub>2</sub> (%)	Observation
Collophanite (Upper)	Quartz	Primary	-3.4	-50	104?	5.0	Boiling
	Quartz	Primary	-10.3 to -6.1	-60	~100	12.5 to 15.0	Necking
Episyenite (Upper)	Apatite I	Primary	-23	-150	108	25.5	Necking
	Apatite II	Primary	-16 to -17	-150 to -104	98 to 136	19.5	Necking
Breccia (-144 m)	Ankerite	Primary	No freezing	—	—	High	

tf(°C) = temperature of fusion for the ice; ts(°C) = temperature for gel solidification; th(°C) = temperature of homogenization not observed.

The smoky appearance of certain sharply-defined zones alternating with clear zones in apatite crystals or in almost the whole of the collophane indicates a high velocity of fluids and rapid deposition at low temperatures. This fact may be responsible for the concentration of uranium in the phosphate [15] without separating into actual minerals or then forming uraniferous minerals with very fine granulation ( $10^{-6}$  mm [Ref.10]). The first hypothesis appears to be more viable owing to the facts stated above.

The alternation of clear and smoky zones in apatite crystals and in collophane also suggests (W.S. Fyfe, private communication) the presence of a pulsed regime with intermittent discharges, such as a present-day geothermal system associated with thermal springs.

## CONSTRUCTION OF A MODEL

The formation of any mineral deposit requires the presence and interaction of a set of favourable circumstances: source rocks which supply the elements, a favourable physico-chemical environment allowing selective concentration of these elements through fluids, and the capacity of the enriched fluid to migrate to another environment with appropriate physico-chemical conditions for deposition. This set of parameters, however, varies markedly in time and space, giving rise to specific models although depending on a general system.

The emplacement of granitic bodies in the upper crust, chiefly by the mechanism of rising plutons, results in thermal perturbations taking the form of heat transfer and circulation of fluids.

The circulation of large volumes of fluids reacting with rocks causes intense chemical and mineralogical alterations even at distances of several kilometres from the igneous bodies [16] which control the process. In the study of hydrothermal models of mineralization the convection of fluids should therefore be taken as a characteristic mechanism for these environments, provided that the rocks involved are sufficiently porous to allow movement.

All the geological and mineralogical characteristics encountered at Itataia suggest that the deposit may represent the crest of a geothermal structure associated with a system of convection in which the whole megafabric could have been controlled by a granitic pluton at depth in the neighbourhood of the deposit, the presence of which is suggested only by apophyses, dykes and domes identified at the surface and in core samples. During emplacement this granite body encountered conditions favourable for the generation of a geothermal system in rocks that were already highly porous, owing to the regional tectonic stresses prior to the intrusion. The intrusion itself contributed to increasing the porosity by intense hydraulic fracturing even during the mineralization phases.

The superimposed features suggest an intriguing similarity with present-day geothermal systems and even participation of highly saline fluids of the brine type.

Regional fracturing, together with hydraulic fracturing (similar to that which develops in the porphyritic copper models), generated a highly porous domain which promoted the development of a mineralized body called 'thermal mushroom' by W.S. Fyfe (private communication), an example of which is found at Wairakei, New Zealand.

The formation of this body of interesting morphology could have taken place in a polycyclic-pulsed regime, as is suggested by the zoning of crystals of apatite and collophane, in which the clear zones would indicate deposition by fluids with low velocity (charge and recharge), and the smoky zones deposition by fluids with high velocity (discharge).

Oxidizing fluids originating near the surface (meteoric water?), which are cold and highly saline and capable of extracting uranium and phosphorus from rocks, would infiltrate and feed the system. Upon infiltration they would both be subjected to the influence of energy (heat) from the granite body and also be mixed with heated and saline-reducing fluids injecting  $H^+$  (juvenile water?), likewise transporting some uranium and phosphorus. When the fluids are mixed, minerals would be released in the porous rocks. Coming into contact with marble, the fluids would have their pH increased; this would lead to rapid deposition of apatite and uranium under reducing conditions.

This process would be repeated cyclically, in polycyclic pulses, reflecting recharge/discharge regimes, activated by fluid convection cells. It is not improbable that concentrations of base metals and even Au and Ag might be located at depth.

## CONCLUSIONS

Because of its regional distribution, the phosphoro-uraniferous mineralization discovered by NUCLEBRAS in the state of Ceará is an important metallogenic event in the Brazilian Cycle. It is clearly related to late granitic activities from which they originated by post-magmatic processes connected with fluid convection.

The deposition took place in two phases, an early phase at a temperature between 350 and 200°C, probably in the presence of fluids rich in NaCl responsible for the formation of uranium-bearing episyenites from rocks which were initially granitic, and a late phase at temperatures between 130 and 50°C under the action of fluids with a high  $CaCl_2$  content which is responsible for the intense deposition of collophane with high uranium content.

High-salinity fluids are quite suitable for the mineralogical transformations – desilicification, albitization, analitization and phosphatization, which characterize the mineralization.

The origin of the water involved in the mineralization is not known; its nature (meteoric or juvenile, or a mixture of both) depends on isotopic analyses ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ), which are decisive, moreover, for clarifying the origin of the dissolved salts.

Likewise, the source of chlorine cannot be determined directly but should be consistent with the nature of the water and the geological environment from where it is derived. Nevertheless, in cases of high salinity (26% equivalent) its origin can be associated with the 'formation brines' not necessarily related to evaporites, but certainly related to the geothermal brines. The predominant presence of salts in the fluids of hydrothermal deposits has been demonstrated by studies of fluid inclusions where the Cl-anion prevails. The part played by chlorides in the fluids responsible for uraniferous mineralizations is considered to be of great importance [10, 17].

The 'daughter minerals' quartz, ankerite and apatite are the substances which saturated the fluids and should be regarded as an integral part of the overall composition of these fluids [18].

Granite itself must have been a source of uranium since it exhibits a high basic concentration (more than 10 times the normal clark of these rocks) which can be extracted by the action of supersaturated saline fluids.

The origin of the phosphorus still remains an open question. If mineralization were restricted only to the regions of occurrence of carbonate rocks, one could assume the existence of sedimentary concentrations of associated phosphorite from which phosphorus would have been extracted hydrothermally by the circulation of fluids and concentrated as cryptocrystalline apatite, collophane [19]. Even so, how are the concentrations of apatite in the episyenites of the Central Massifs (Tamboril-Itapagé and Tróia-Tauá-Macaoca), where carbonate rock are not known to exist, to be explained? An originally sedimentary source of the phosphorus seems to be quite conceivable. It is, moreover, not improbable that part of the uranium is derived from this sediment.

Another aspect under study is the form in which uranium is associated with apatites. In this regard, some related facts should be considered. Since the ionic radius of  $\text{U}^{+4}$  (0.97 Å) is very close to that of Ca (0.99 Å), the former could substitute Ca in the structure of apatite. Values from 10 to 100 ppm of U in igneous apatites, and from 20 to 200 ppm in sedimentary apatites, are well documented.

According to Slansky [20], the content of uranium in most phosphorites is generally below 200 ppm, in the ratio of 1.7 to 12 ppm of  $\text{U}_3\text{O}_8$  to 1%  $\text{P}_2\text{O}_5$ . An exception is the Bakouma deposit in Zaire with an average concentration of 8000 ppm of  $\text{U}_3\text{O}_8$  for a maximum of 35% of  $\text{P}_2\text{O}_5$  (an average of 20.37%), which is about 147 ppm of  $\text{U}_3\text{O}_8$  to 1%  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

In Itataia surface samples this ratio varies from 60 to 120 ppm of  $U_3O_8$  to 1%  $P_2O_5$  attaining at depth more than 150 ppm of  $U_3O_8$  to 1%  $P_2O_5$ . This is one of the largest  $U_3O_8/P_2O_5$  ratios known in the world, despite the correlation factor of 0.710 indicating that there is no fully linear correlation between uranium and phosphorus.

## REFERENCES

- [1] ANGEIRAS, A.G., Preliminary Aspects of Uranium Mineralization in the Itatira area, Report DEGE/DRM-NUCLEBRAS, Rio de Janeiro (Feb. 1977).
- [2] NEVES, B.B. de B., "Elementos da geologia pré-cambriana do Nordeste Oriental", Congresso Brasileiro de Geologia, XXVII, Anais do Congresso II (1973) 105.
- [3] KEGEL, W., A estrutura geologica do Nordeste do Brasil, Bol. Div. Geol. Min. 227 (1965).
- [4] CLIFFORD, T.N., The Damaran episode in the Upper Proterozoic-Lower Proterozoic structural history of Southern Africa, Geol. Soc. Am., Spec. Pap. 92-77 (1976).
- [5] SANDER, B., Gefügekunde der Gesteine, Springer Verlag, Berlin (1930).
- [6] DEER, W.A., HOWIE, R.A., ZUSSMAN, J., Rock Forming Minerals, Vol.5 - Non Silicates, Longmans, London (1972).
- [7] MOREAU, M., RANCHIN, G., "Altérations hydrothermales et contrôles tectoniques dans les gîtes filoniens d'uranium intragranitiques du Massif Central français", Colloque, E. Raguin Musson et Cie, Paris (1971).
- [8] LEROY, J., Les épiyémites non minéralisées dans le massif de granite à deux micas de Saint-Sylvestre, Limousin, France, Thèse docteur spécialité, Université de Nancy (inédate), 1971.
- [9] WILLIAMS, R.M., LITTLE, M.W., GOW, W.A., BERRY, R.N., "Uranium and thorium in Canada", Peaceful Uses of Atomic Energy (Proc. 4th Int. Conf. Geneva, 1971) Vol. 8, UN, New York, and IAEA, Vienna (1972) 37.
- [10] RICH, R.A., HOLLAND, M.D., PETERSEN, V., "Hydrothermal uranium deposits", Developments in Economic Geology, 6, Elsevier, Amsterdam (1977).
- [11] LEROY, J., POTY, B., "Recherches préliminaires sur les fluides associés à la genèse des minéralisations en uranium du Limousin", Mineralium Deposits 4 (1969) 395.
- [12] FUZIKAWA, K., Estudo Preliminar de inclusões fluidas em amostras de rochas do Projeto Itatira, Relat. Interno. NUCLEBRAS, University of Adelaide, Maio - Adelaide (1978).
- [13] ROEDDER, E., Studies of fluid inclusions II: Freezing data and their interpretation, Econ. Geol. 58 (1963) 167.
- [14] FUZIKAWA, K., YPMA, P.J.A., Some fluid inclusion studies on Jabiluka uranium ore, Symp. on Current Commodity Trends in Mineral Exploration and Evaluation, Adelaide, 1977.
- [15] LARSEN, E.S., PHAIR, G., "The distribution of U and thin igneous rocks", Nuclear Geology, John Wiley and Sons, New York (1954).
- [16] BROWNE, P.R.L., ELLIS, A.J., The Okaki-Broadlands hydrothermal area, New Zealand: Mineralogy and related geochemistry, Am. J. Sci. 268 (1970) 97.
- [17] KOSTOV, I., "Crystallochemical differentiation and localization of uranium ore deposits in the earth's crust", Recognition and Evaluation of Uraniferous Areas (Proc. Techn. Comm. Meeting Vienna, 1975), IAEA, Vienna (1977) 15.

- [18] HOLLAND, M.D., PORCSIK, M., "On the solution and deposition of calcite in hydrothermal systems", Problems of Postmagmatic Ore Deposition, Symp. Prague, II (1965) 364.
- [19] LOWELL, W.R., Igneous intrusions and metamorphism in some phosphatic rocks of SW Montana, Econ. Geol. **50** (1955) 715.
- [20] SLANSKY, M., "Répartition et possibilités de concentration de l'uranium dans les phosphates sédimentaires", Uranium Deposits in Africa: Geology and Exploration (Proc. Regional Advisory Group Meeting Lusaka, 1977), IAEA, Vienna (1979) 239.



**V. RECOVERY OF URANIUM AS BY-PRODUCT  
OF OTHER MINING OPERATIONS**

**V. OBTENCION DE URANIO COMO SUBPRODUCTO  
DE OTRAS EXPLOTACIONES MINERAS**



# PLANTA PILOTO DE RECUPERACION DE URANIO A PARTIR DE SOLUCIONES DE LIXIVIACION DE COBRE EN CHUQUICAMATA SUR, CHILE

P. GARRIDO, E. ANDALRAFT, R. SOTO  
División de Investigaciones Metalúrgicas,  
Comisión Chilena de Energía Nuclear,  
Santiago, Chile

## Abstract-Resumen

### PILOT PLANT FOR URANIUM RECOVERY FROM COPPER LEACHING SOLUTIONS IN SOUTH CHUQUICAMATA, CHILE.

The operation of the pilot plant treating the solutions obtained from ore enrichment at South Chuquicamata (ex Exótica) is described. These solutions are treated in the percolation leaching plant of the Chuquicamata division of Codelco-Chile. They contain about 10–12 ppm of  $U_3O_8$ . The purpose is to recover uranium and to obtain a uranium concentrate as the end product. The treatment consists of passing the leach solution through an ion-exchange resin bed (Ionac A-580 — a strongly basic anion-exchanger) in upward flow. After the absorption process is completed, the resin is washed with industrial water to remove any remaining solution. It is then eluted by a re-extraction agent; the eluate produced is suitable for direct precipitation, which is carried out with gaseous ammonia until pH = 7 is reached. The end product is an ammonium diuranate yellow cake.

### PLANTA PILOTO DE RECUPERACION DE URANIO A PARTIR DE SOLUCIONES DE LIXIVIACION DE COBRE EN CHUQUICAMATA SUR, CHILE.

Se describe el funcionamiento de la planta piloto que trata las soluciones provenientes del beneficio de los minerales de Chuquicamata Sur (ex Exótica). El proceso tiene lugar en la planta de lixiviación por percolación de la División Chuquicamata de Codelco-Chile. Las soluciones contienen aproximadamente de 10–12 ppm de  $U_3O_8$ . El objeto es recuperar uranio y obtener como producto final un concentrado de este elemento. El tratamiento consiste en pasar la solución de lixiviación por un lecho de resina de intercambio iónico (Ionac A-580, intercambiador aniónico fuertemente básico) con flujo ascendente. Terminado el proceso de absorción, la resina se lava con agua industrial dejándola libre de solución remanente; posteriormente se eluye con un agente de reextracción, obteniendo un eluido con una concentración de uranio que se precipita en forma directa. La precipitación se realiza con amoníaco gaseoso hasta llegar a un pH = 7; el producto final es un concentrado de diuranato de amonio.

## 1. INTRODUCCION

Desde que se advirtió la posibilidad de recuperar uranio de los minerales de cobre de Chuquicamata, se realizaron estudios con el objeto de obtener este elemento en forma de concentrado.

Como resultado de estas investigaciones, en 1977 se firmó un convenio entre Codelco-Chile, División Chuquicamata y la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), mediante el cual se efectuó la ingeniería y construcción de una planta piloto que comenzó a funcionar en noviembre de 1977 con personal de la División de Investigaciones Metalúrgicas de la CCHEN y la División Chuquicamata.

El estudio de los resultados de explotación de esta planta piloto y un estudio de factibilidad permitirán determinar en definitiva la construcción de una planta industrial cuya producción formará parte del acopio nacional de materiales atómicos naturales.

## 2. INSTALACION DE LA PLANTA PILOTO

### 2.1. Equipos

Para el proceso de intercambio iónico, las principales instalaciones de la planta son las que se describen a continuación:

- Cuatro torres de acero revestidas de poli-uretano de 12 m<sup>3</sup> de capacidad útil. El diámetro de cada una de ellas es de 1,8 m a noventa centímetros del fondo; las torres tienen una malla filtrante sobre la que se coloca la resina. La alimentación se efectúa por la parte inferior en forma ascendente, mediante una entrada de 6". Existe también en esta parte una entrada de 2" de diámetro para la inyección de agua de lavado. En la parte superior, tienen un vertedero para la evacuación de la solución.
- Tres estanques de acero, revestidos con poli-uretano de 2,42 m de diámetro y 1,30 m de alto. Un estanque de acero inoxidable de 1,40 m de diámetro y 1,30 m de altura. En ellos se prepara el eluyente y se reciben los eluidos.
- Un estanque de acero inoxidable usado como cabeza de solución de alimentación, de 1,40 m de diámetro.

### 2.2. Movimiento de soluciones

Para este objetivo, la planta piloto cuenta con el siguiente equipo:

- Una bomba Bingham de 10 X 8 pulg que alimenta al estanque de cabeza de la planta piloto desde el estanque que contiene la solución de alimentación.
- Dos bombas Worthington de 15 HP usadas para el movimiento de las soluciones eluyentes.
- Una bomba Hazleton vertical, multietapa usada para evacuar las soluciones de descarte de las torres.

## 2.3. Operación

El proceso de intercambio iónico comprende las siguientes etapas:

- Carga de la resina
- Lavado ascendente y descendente
- Elución
- Lavado descendente
- Precipitación directa de eluídos

### 2.3.1. *Carga de resina*

Para cargar las torres con solución rica de lixiviación de minerales de Chuquicamata Sur (ex Exótica) se envía ésta al estanque de cabeza, valiéndose de una bomba Bingham. Desde allí, la solución baja y entra en las torres por el orificio inferior de 6 pulg.

Esta operación se puede efectuar con las torres en serie. Para este último paso, la solución que ha entrado a la primera torre cargada con resina rebalsa y cae por el vertedero. Esta misma solución entra en la segunda torre de la serie y su rebalse va a descarte. La resina se cubre completamente con dos volúmenes de lecho.

Una vez producida la saturación de la resina, se detiene la primera torre de la serie y se incorpora una nueva para continuar con la serie de dos columnas en carga o una en forma individual.

### 2.3.2. *Lavado descendente y ascendente*

La columna saturada entra al proceso de lavado descendente, para lo cual se opera como sigue: desde el estanque de agua baja una cañería de 2 pulg que alimenta a cada torre por duchas o por la entrada inferior de 2 pulg en el caso de lavado ascendente. Estos lavados tienen por objeto limpiar la resina de restos de solución de lixiviación de cobre.

### 2.3.3. *Elución*

Como se indicó en la descripción de equipos, la solución eluyente se prepara en los estanques mencionados. La solución eluyente es impulsada a la parte superior de la columna por una bomba Worthington y cae sobre la resina produciendo la elución.

La solución de eluido se recibe en los estanques para este propósito y se envía a estanques de precipitación.

**CUADRO I. CONCENTRACION DE LOS ELEMENTOS Y COMPUESTOS DE LA SOLUCION DE LIXIVIACION QUE ALIMENTA LAS TORRES DE INTERCAMBIO IONICO**

	Fe	Fe <sup>3+</sup>	SiO <sub>2</sub>	P	H <sup>+</sup>	Cu	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mo	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Concentración en g/l	4,5	3,0	2,0	0,9	3,0	36,0	14,0	0,006	0,01

### 2.3.4. Lavado descendente

Se realiza en la misma forma indicada en la subsección 2.3.2.

### 2.3.5. Precipitación directa de eluido

El eluido obtenido en intercambio iónico se envía mediante la bomba Worthington al estanque de precipitación.

La precipitación misma se efectúa en un decantador, donde se coloca el eluido y se le agrega amoníaco gas agitando con aire, elevando así el pH a 7–7,5. Se obtiene entonces el precipitado diuranato de amonio. El líquido sobrenadante se saca sifoneando y, una vez ajustado a las condiciones iniciales, se usa como eluyente.

## 3. FASE PILOTAJE

### 3.1. Intercambio iónico

En intercambio iónico se han determinado los siguientes parámetros de operación:

#### 3.1.1. Solución de alimentación

Los rangos de concentración de los elementos y compuestos se dan en el Cuadro I. La concentración de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> ha estado comprendida entre 8,5 y 15,5 mg/l.

#### 3.1.2. Fase de carga de la resina

Se ha trabajado con flujos de alimentación entre 30 y 40 gal/min (6,8 m<sup>3</sup>/h–9,1 m<sup>3</sup>/h) por torre. Produciendo un tiempo de residencia comprendido entre 15 y 20 min.

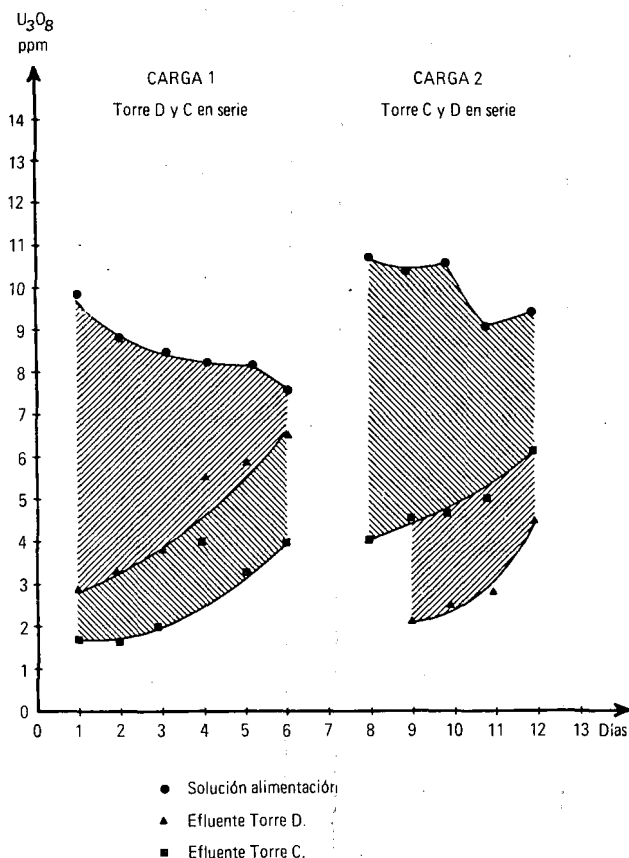


FIG.1. Operaciones de carga de 2 torres en serie con resina IONAC-580.

Se ha determinado trabajar solo hasta un 50% de eficiencia para evitar así que la resina absorba mayor cantidad de impurezas; este porcentaje se alcanza al cabo de 5 a 7 días de manipulación con el flujo indicado anteriormente y con 4 pies de altura de resina (Fig. 1).

La capacidad de carga de la resina ha sido de 10 g de  $U_3O_8$ /l de resina en condiciones reales de explotación.

### 3.1.3. Arrastre de resina

Para evitar problemas de arrastre de resina se ha trabajado con flujo de 40–50 gal/min, lo que produce una expansión del lecho del 80%.

CUADRO II. CARGA DE RESINA IONAC 580 EN 8 HORAS DE PROCESO  
– RAZON IMPUREZAS/URANIO

	Operación A		Operación B	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Fe/U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	514,89	504,25	570,52	500,00
Fe <sup>3+</sup> /U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	348,94	326,59	406,31	335,79
SiO <sub>2</sub> /U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	276,59	282,98	276,84	266,32
P/U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	98,93	100,00	111,57	100,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1809,57	1809,57	822,11	806,31
Mo/U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0,63	0,45	0,47	0,39
H <sup>+</sup> /U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	308,51	308,51	442,11	273,68

### 3.1.4. Selectividad de resina

Se comprobó que la resina usada es selectiva para el uranio con respecto a otros elementos o compuestos presentes en la solución. Sólo el Fe que se absorbe químicamente y la SiO<sub>2</sub> que actúa en forma física bloqueando los sitios activos de intercambio, son las impurezas que se absorben en forma más notable.

En los Cuadros II y III se dan dos ejemplos de carga de 8 horas de proceso.

### 3.1.5. Influencia del pH

Se determinó que el pH óptimo de la operación de carga es 1,8, el usual en este tipo de operación; bajo este valor, la eficiencia de carga decrece hasta niveles mínimos a pH 1,4–1,5. A pH 2,0 se forma un compuesto de fosfato férrico que precipita en la malla que sustenta la resina.

### 3.1.6. Fase de elución

La elución se efectuó con diferentes tipos de eluyentes; el de mejor eficiencia fue el formado por NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 0,9M + HNO<sub>3</sub> 0,1M, pero debido al elevado costo de estos reactivos, se usó en forma cotidiana el eluyente formado por NaCl 9% + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,1N. Comúnmente se ha trabajado con una velocidad de flujo de 2 volúmenes de resina/h, que es el caudal recomendado por los resultados de experiencias a nivel de laboratorio.

CUADRO III. QUINTO DIA DE EXPLOTACION CON DOS TORRES EN  
SERIE — RESINA IONAC A-580 (g/l)

	TORRE C		TORRE D	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0,0099	0,0044	0,0044	0,0022
Fe	5,15	5,08	5,08	5,08
Fe <sup>3+</sup>	3,59	3,57	3,57	3,57
SiO <sub>2</sub>	2,57	2,57	2,57	2,57
P	0,91	0,88	0,88	0,90
H <sup>+</sup>	2,6	2,6	2,6	2,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,75	15,75	15,75	15,50
Mo	0,0067	0,0052	0,0052	0,0042

Otros eluyentes probados fueron: NaNO<sub>3</sub> 1M + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,1 N y NaCl 6% + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,1 N, los que fueron sustituidos por los nombrados anteriormente.

Se han utilizado 4 volúmenes de resina como eluyente, y la concentración promedio ha sido de 350 ppm de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> aproximadamente (Fig. 2).

### 3.1.7. Bloqueo de resina

El veneno principal que se ha detectado en la resina ha sido la sílice que ha bloqueado la superficie y sitios de intercambio de ella.

Los análisis de resina cargada y eluída en cuanto a impurezas dieron los valores que se muestran en el Cuadro IV.

### 3.1.8. Lavado básico de resina

Para regenerar la resina y con ello eliminar la sílice, se ha determinado pasar una solución de NaOH al 4%, según los resultados obtenidos en laboratorio tras diversas pruebas con distintos porcentajes de NaOH.

A escala piloto, se había efectuado una regeneración con NaOH al 7,6%, con lo que se logró reestablecer la eficiencia de absorción de la resina a un 80% de la eficiencia original.

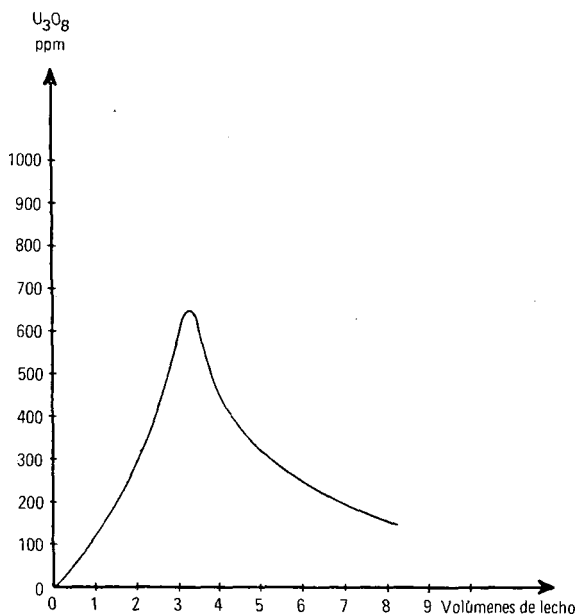


FIG.2. Elución de resina IONAC A-580 con NaCl al 6% más H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,1 N.

CUADRO IV. % DE ELUCION DE IMPUREZAS EN RESINA IONAC A-580

	SiO <sub>2</sub>	Fe	Cu	Mo	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P
% de elucion	19,61	80,77	61,76	0,00	100,00	39,50

3.2. Extracción por solventes de eluidos de intercambio iónico

Para realizar esta experiencia se eluyó la resina con una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1M.

Como extractante orgánico se usó Alamine 336 al 5% vol.%, isodecano al 3%, tridecano al 92%.

A la extracción por solventes se llegó con un eluido de 100 ppm aproximadamente de concentración de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. Se usaron cuatro etapas de extracción y dos de reextracción. En la reextracción se usó NaCl al 10% + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,1 N. Se precipitó una solución con una concentración de 500 ppm U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>.

Con respecto a este tipo de proceso se siguen efectuando nuevas pruebas que darán mayor información sobre él.

**CUADRO V. ANALISIS DE CONCENTRADOS – PRODUCTO DE PRECIPITACION DIRECTA DE ELUIDOS**

	Concentrado 1 en %	Concentrado 2 en %	Concentrado 3 en %	Concentrado 4 en %
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	24,30	17,90	21,50	38,90
SiO <sub>2</sub>	8,60	16,58	14,36	12,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,41	4,24	6,20	3,45
Fe	1,31	12,96	14,74	10,90
Cu		4,06	8,16	0,83
P	3,85	7,15	2,84	3,30
Mo		1,84	1,35	1,28

**CUADRO VI. ANALISIS DE CONCENTRADO  
– PRODUCTO DE REPRECIPITACION DEL  
CONCENTRADO OBTENIDO DE PRECIPITACION  
DIRECTA DE ELUIDOS**

	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Fe	Cu	Mo
Concentración en %	84,74	0,04	1,00	0.78

### 3.3. Precipitación

Los eluidos se llevaron a precipitación directamente. Se ha usado amoníaco gaseoso como agente de precipitación y agitación con aire.

Se llega a un pH 7,0, obteniéndose como producto final un concentrado de diuranato de amonio con una concentración de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> que ha variado entre el 12% y el 39% sobre base seca. En el Cuadro V se dan los resultados de los análisis de los concentrados.

Esos concentrados se han almacenado en forma de pulpa debido a problemas de filtración causados por el tamaño muy fino de las partículas. Posteriormente se tratarán otra vez para purificarlos y obtener un producto de pureza nuclear.

En experiencias efectuadas en laboratorio se han logrado concentraciones del 84,74% de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, en la purificación del concentrado (Cuadro VI).

#### 4. CONCLUSIONES

- Se probó técnicamente que es posible producir concentrado de uranio a partir de soluciones de lixiviación de cobre en Chuquicamata, de muy baja concentración de este elemento (10 a 12 ppm de  $U_3O_8$  en general).
- No se producen interferencias en el proceso productivo del cobre.
- El pH 1,8 produce mejores rendimientos en la etapa de absorción, como es lo usual en este tipo de procesos.
- Se han utilizado tiempos de residencia de 15 a 20 min en la absorción y de 30 min en la elución con cloruro y sulfato con resultados satisfactorios.
- Como eluyente se ha convenido utilizar  $NaCl$  1,5 M +  $H_2SO_4$  0,1 N cuando se efectúa precipitación directa de eluidos y  $H_2SO_4$  si los eluidos son tratados por extracción por solventes.
- Es recomendable efectuar ciclos de carga cortos, llegando a una eficiencia de carga del 50% como mínimo; así se evita que la resina se cargue de impurezas que compiten con el uranio.
- Es factible obtener concentrado de pureza nuclear a partir de los concentrados producidos por precipitación directa de eluidos de Chuquicamata.
- Con la evaluación técnico-económica de la planta piloto, se determinará la construcción de la planta industrial que producirá alrededor de 80 toneladas anuales de torta amarilla.

#### BIBLIOGRAFIA

- COMISION CHILENA DE ENERGIA NUCLEAR, Evaluación Económica Proyecto Uranio Sur, Corporación Nacional del Cobre de Chile, Santiago (1978).
- COMISION CHILENA DE ENERGIA NUCLEAR, Información Técnica Area Chuquicamata, Dirección de Materiales Nucleares, Santiago (1977).
- COMISION CHILENA DE ENERGIA NUCLEAR, Informes de Avance Operación Planta Piloto Sur, División de Investigaciones Metalúrgicas, Santiago (1978).
- GARRIDO, P., Preconcentración de uranio por intercambio iónico, con aplicación directa a soluciones de lixiviación de Exótica, Mem. título Ingeniero Civil de Minas, Univ. de Chile, Santiago (1975).

#### DISCUSSION

C. OLAVE: What was the pH of the solution obtained from the leaching of the mineral and was it necessary to use further treatment to get the pH of 1.8 needed for ion exchange?

P. GARRIDO: The solution obtained was suitable for the actual leaching process at a pH of 1.8 because the acidity has no effect after the recovery of the copper. In general, the pH of the leaching solution has not been above 2.0–2.2; in these cases the solution is treated in the pilot plant by the addition of  $\text{H}_2\text{SO}_4$  to produce a pH of 1.8 before it is passed over the ion exchange resin.

P.M. BARRETTO: This paper was very interesting and informative. I would like to ask if you could give us any information about the capacity of the industrial plant for recovering uranium from the Chuquicamata copper.

P. GARRIDO: According to the preliminary studies that were carried out, the industrial plant will produce 30–35 t of yellow-cake uranium concentrate in the initial phase; eventually, an output of 80 t/a of  $\text{U}_3\text{O}_8$  will be achieved.

C. ZELADA: What criteria were used in selecting the point in the copper recovery process where the uranium would be recovered, and what were the copper and uranium concentrations in the solution used?

P. GARRIDO: The uranium recovery point in the process was selected after systematic sampling which was carried out at all stages of the copper ore treatment. On the basis of this, we selected the point in the circuit that would cause the least possible interference with the copper process.

In the specific case of the Chuquicamata mine, we chose the solution that is obtained immediately after the leaching of the ore (a strong solution). The copper concentration in this is 36 g/l and the uranium concentration 10–12 ppm  $\text{U}_3\text{O}_8$ .



**REPORTS OF  
THE WORKING GROUPS**

**INFORMES DE  
LOS GRUPOS DE TRABAJO**



Informe del Grupo de trabajo 1  
**TECNICAS DE EXPLORACION APLICADAS A AMBIENTES  
GEOLOGICOS DE AMERICA LATINA**

## 1. OBJETIVOS

América Latina tiene una variedad de ambientes geológicos combinados con difíciles condiciones de superficie (bosques, lluvia tropical, desiertos, sabanas, altiplanos, cordilleras, etc.), y los objetivos de exploración van dirigidos generalmente a grandes zonas de arduo acceso para las que no se dispone de información geológica detallada. Las experiencias adquiridas en algunos de estos ambientes son de enorme interés para los países vecinos. ¿Cuáles son los métodos que conducen a descubrimientos?

Los objetivos del Grupo son:

- Identificar las dificultades o problemas (técnicos, de organización, información o capacitación) que retardan la aplicación de un programa efectivo de exploración, y recomendar posibles soluciones.
- Identificar los tipos de programas de exploración (“exploration approaches”) que han tenido éxito (ejemplos).
- Identificar las técnicas de exploración utilizadas y las condiciones o adaptaciones con que se aplicaron.

## 2. TECNICAS APLICABLES A LOS DIFERENTES AMBIENTES

Considerando los diferentes ambientes geográficos, geológicos y climáticos de Latinoamérica, se pueden reconocer muchos problemas relacionados con la aplicación de los diversos métodos de prospección.

Debido a esa diversidad de ambientes es imposible tratarlos todos, o recomendar *sugerencias útiles en la adaptación de métodos* para todas las situaciones ambientales existentes. Por este motivo, el Grupo de trabajo ha concentrado sus discusiones en cuatro ambientes de mayor importancia, a saber:

- 1) Selvático tropical
- 2) Las sabanas
- 3) Desértico (y subdesértico)
- 4) Cordillera.

En el último caso se incluyó la zona subandina, que comprende las áreas de pendientes fuertes y de mal acceso. Esta se sitúa a lo largo de la franja oriental

de la Cordillera principal. También se incluyó aquí la zona del Altiplano, que se limita a áreas del Perú y Bolivia y que, aparte de su altura geográfica notable, no presenta problemas especiales.

Los ambientes se tratan a continuación con respecto a sus características principales, y a metodologías sugeridas o aptas.

## 2.1. Ambiente selvático tropical

### 2.1.1. Características

Los factores resaltantes de este ambiente son la dificultad de acceso, la cobertura vegetal, el espesor de los suelos residuales, la poca cantidad de afloramientos, añadiéndose a esto la falta de información geológica, lo que hacen difíciles y altamente costosas las exploraciones.

### 2.1.2. Metodología

- a) La prospección radiométrica aérea sería el método más indicado por razones de acceso, pero al mismo tiempo pierde efectividad debido a las espesas capas de los suelos residuales y a la densa vegetación. El método requiere equipos de alta sensibilidad a la radiación natural. La espectrometría es esencial, lo mismo que los equipos de navegación y de altimetría. El registro aeromagnético simultáneo es recomendable como guía geológica.
- b) El uso de helicóptero se hará necesario en ciertas áreas de topografía más difícil, como también en la posterior comprobación y muestreo de las anomalías.
- c) La experiencia en Asia y en la región de la cuenca amazónica nos enseña que las pequeñas embarcaciones de goma, con o sin motor fuera de borda pueden ser muy eficientes en bosques tropicales para realizar el muestreo geoquímico y levantamientos radiométricos.

## 2.2. Ambiente de sabana

### 2.2.1. Características

Se caracteriza por poseer generalmente espesas coberturas de suelos residuales o de sedimentos transportados. Los patrones de drenaje corresponden mayormente al estado de madurez. Muchas veces los ríos presentan cambios violentos con niveles máximos de aguas durante la estación lluviosa, provocando zonas de inundación. En estas zonas se desarrollan suelos agropecuarios.

### 2.2.2. Metodología

- a) Es recomendable realizar todas las labores durante la estación seca, por la facilidad de acceso y mustreo.
- b) Conviene efectuar la prospección radiométrica autoportada con espectrómetros de grandes cristales.
- c) Es aconsejable muestrear las aguas de los pozos existentes, sacando, si fuese posible, informaciones radiométricas con sondas.
- d) La información estratigráfica y radiométrica de los registros gamma obtenida de los pozos petrolíferos puede ser de gran ayuda.
- e) La emanometría orientada como apoyo a la interpretación geológica radio-métrica es una técnica que merece consideración.
- f) Pueden ser de utilidad las muestras obtenidas de minerales pesados y de suelos en las áreas de sedimentos residuales.
- g) El muestreo de los sedimentos finos y las medidas radiométricas de las vertientes provenientes de los vestigios rocosos (monadocks) sobre la sabana han sido provechosos en varios países.

## 2.3. Ambiente desértico (y subdesértico)

### 2.3.1. Características

Las zonas desérticas de Latinoamérica se sitúan generalmente en la costa del Pacífico (Perú y Chile). El acceso lo facilitan vehículos de doble-tracción, siempre que se pueda disponer de apoyo logístico, ya que son escasas las estaciones de base con medios suficientes. La cobertura de materiales eólicos crea problemas. Las amplias llanuras están cubiertas por materiales modernos no consolidados. Además, existen grandes áreas con material de pie de monte que, si son extensas, impiden todo tipo de prospección. Las avalanchas esporádicas serían el medio principal de transporte de este material. La topografía de quebradas (cañones) puede limitar el reconocimiento de las zonas altas pero, al mismo tiempo, las quebradas actúan como canales receptores para el material de erosión.

### 2.3.2. Metodología

- a) Los reconocimientos aéreos funcionan bien en áreas de bajo relieve, pero sobre las llanuras pueden ofrecer resultados aleatorios (en la cobertura).
- b) Aunque las zonas son desérticas, hay a menudo sistemas de drenaje bien desarrollados, especialmente en las quebradas. Las lluvias son escasas, pero el material de drenaje es de tipo aluvial y representativo de las zonas altas. El muestreo de sedimentos de drenaje de este "drenaje seco" es efectivo y útil. No obstante, la dilución por material eólico u otro exótico puede

- constituir un problema; en este caso, el muestreo de minerales pesados suministra a menudo un método relativamente efectivo.
- c) Si existe control terrestre (por ejemplo, fotografías aéreas), la proyección radiométrica autoportada puede ser útil en las áreas donde existen afloramientos.
  - d) Los paleodrenajes, y también los drenajes modernos deben ser revisados por posibles acumulaciones de caliches uraníferos. Estos drenajes pueden observarse en las fotos aéreas y comprobarse en el terreno.
  - e) Los ambientes de tipo salar en cuencas cerradas deben ser revisados. El uranio puede concentrarse por evaporación en las últimas soluciones y precipitarse en los sedimentos o sales de evaporación (caliches uraníferos). Esta revisión ha resultado útil en la República de Sudáfrica y Namibia.

## 2.4. Cordillera

### 2.4.1. Características

La palabra “cordillera” incluye aquí todas las áreas profundamente seccionadas de alta o baja altura. La característica más elocuente es la topografía brusca y rugosa. En la parte superior hay muchos rasgos casi glaciales, y hay también valles cubiertos con material de origen glacial. Las limitaciones principales son las inclinaciones abruptas de la topografía y la dificultad de acceso. Los afloramientos son buenos, especialmente a lo largo de caminos y vías férreas.

### 2.4.2. Metodología

- a) Debido a estas condiciones topográficas, se recomienda encarecidamente el método de prospección de drenaje. La prospección geoquímica en sedimentos de ríos ha sido exitosa. Esta se ha llevado a cabo, por ejemplo, en la Cordillera Canadiense, con helicópteros, poniendo dos hombres en la cabecera del río en la mañana y recogiendo el río abajo al término del día. El grupo debe hacer observaciones radiométricas y geológicas complementarias para optimizar el rendimiento del trabajo.
- b) Prospección aeroportada. Generalmente es difícil hacer una prospección aérea sistemática con espaciamiento regular entre las líneas de vuelo. Esta prospección requiere aviones o helicópteros de gran capacidad de acción. Se han realizado con éxito prospecciones aéreas en la cordillera de los Estados Unidos mediante avión liviano, cubriendo la zona en líneas y contornos irregulares, lo que posteriormente dió origen a líneas de mosaico semicontinuo. La recuperación de datos de vuelo es a menudo difícil.
- c) Prospección radiométrica autoportada. Si los caminos son accesibles, la prospección autoportada es una pieza muy útil como “primer reconoci-

miento”, dependiendo de la calidad de los afloramientos. No es necesaria una malla densa de caminos para esta forma de exploración general.

- d) Los minerales pesados podrían ser analizados para el uranio lábil. En el reconocimiento, donde una densidad baja de observaciones es común, los minerales pesados tendrán grandes colas de dispersión, de manera que un muestreo de densidad baja permita obtener datos útiles.
- e) Las aguas de drenaje, vertientes, norias y pozos deben ser investigados, si las condiciones lo permiten.

### 3. OBSERVACIONES GENERALES

- 1) Se puede hacer mucha “prospección” barata, sin realizar trabajos de exploración física. Cualquier programa debe buscar y utilizar aquellas fuentes de información ya disponibles, como pueden ser:
  - a) Muestras geoquímicas recolectadas por el gobierno o instituciones privadas durante el trabajo geoquímico efectuado para otros elementos. Muchas veces éstas se encuentran disponibles en depósitos.
  - b) Los registros de rayos gamma se toman usualmente en perfiles de pozos perforados para exploración de petróleo. Un programa conjunto con la empresa de petróleos para revisar estos registros gamma podría proporcionar una información útil con respecto a la distribución de uranio en la columna cronoestratigráfica.
  - c) Durante la realización de los estudios hidrológicos sobre la calidad y disponibilidad de agua, muchas veces son analizadas las aguas de vertientes, norias y pozos. A través de un programa conjunto con la autoridad competente en estudios hidrológicos, las muestras de aguas pueden ser conservadas para análisis de uranio.
  - d) El examen radiométrico de testigos de sondeos se recomienda encarecidamente.
- 2) Es evidente que los minerales pesados son un medio sensitivo y que se dispersan bien en la detección geoquímica del uranio. Las muestras de minerales pesados son separadas con gamella, después son analizadas para el uranio soluble en ácido fuerte (no disolución total); este ataque deja libre al uranio que se encuentra bajo varias formas (ej. limonita). Este método merece ser sometido a prueba en varios ambientes, teniendo a disposición un sedimento de río, arena o limos.
- 3) La aplicación de técnicas de prospección debe guiarse por los recursos (humanos, materiales, financieros) de que se pudiera disponer en ese momento o en el futuro. Un modesto programa a largo plazo, pero bien planificado

puede ser más efectivo que otro a corto plazo y a un alto costo. La experiencia en varios países ha demostrado que el compromiso de una exploración limitada a largo plazo y llevada a cabo en forma constante, es mucho más susceptible de éxito que programas intermitentes de corta duración, aunque estén bien financiados.

#### 4. DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Grupo identificó, a grandes rasgos, los siguientes problemas:

##### 4.1. Problemas de capacitación e información

En general se ha detectado una capacitación insuficiente a nivel de técnicos medios. También se ha notado la poca accesibilidad a la información existente sobre técnicas y métodos de exploración, al no disponerlas en castellano.

Se propone al Organismo:

- a) Que el Organismo disponga, en breve, la traducción al castellano de las principales publicaciones relativas a la exploración de uranio.
- b) La creación de cursos de entrenamiento y perfeccionamiento, los cuales deberán ser asesorados por los expertos de la región.
- c) La realización de reuniones periódicas, con el objeto de intercambiar experiencias en lo referente a técnicas, métodos y avances en la exploración de uranio en los países de la región.

##### 4.2. Problemas de equipamiento

Se ha detectado, en la región, la necesidad de contar con equipamiento adecuado para efectuar las exploraciones. Es de conocimiento general el elevado costo que representan los elaborados equipos actuales, especialmente en lo que se refiere a las técnicas de prospección aeroportada y a otras. Esto repercute directamente sobre los Estados Miembros que no disponen de ese material para realizar los trabajos.

Por otra parte, hay que reconocer que algunos países no cuentan con equipo para el trabajo básico, por no existir programas o instituciones permanentes para la búsqueda de minerales de uranio.

Se propone al Organismo:

- a) La creación de un "Centro" en la región, el cual deberá contar con equipos básicos y elaborados, y con otros cuya necesidad se detecte en el futuro, tales como:
  - Equipo de espectrometría aérea para ser instalado en aviones o helicópteros, con detector de unos 15 litros;

- Equipos para perforaciones;
  - Instrumental de computación y acceso a los programas requeridos;
  - Escintilómetros;
  - Equipos básicos de laboratorios.
- b) Servicio de mantenimiento y de repuestos para los equipos del “Centro”.
- c) El Organismo podría disponer el arriendo de los equipos, a bajo costo, de modo que éstos puedan ser amortizados y, consecuentemente, renovados.

*MIEMBROS QUE PARTICIPARON EN LA REUNION DEL GRUPO  
DE TRABAJO 1*

Audemard, F.E. ( <i>Presidente</i> )	Venezuela
Taylor, J. (OIEA) Virreira, V.	Bolivia
Tauchid, M. (OIEA)	Colombia
Martín, M. (OIEA) Moxham, R.L. (OIEA)	Chile
Wright, R.J.	Estados Unidos de América
Grimbert, A.	Francia
Toens, P.D.	Sudáfrica
Morales, G. Rogovich, A. Smith, A. (OIEA)	Perú



**CORRELACION GEOLOGICA Y TECTONICA ENTRE AFRICA  
Y SUDAMERICA, APLICADA A LA EXPLORACION DE URANIO**

**1. OBJETIVOS**

Basándose en la distribución geológica y geográfica de las mineralizaciones conocidas en las placas de Africa y Sudamérica, el Grupo deberá:

- Identificar los eventos tectónicos cuyo control esté relacionado con la mineralización del uranio en ambos continentes. Identificar su cronología y distribución geográfica.
- Identificar los ambientes geológicos similares a los de Africa con mineralizaciones conocidas, que tendrían potencial para mineralización de uranio, etc.
- Si la información geológica disponible es insuficiente, recomendar el tipo de investigación, programas de investigación básica y aplicada, etc, para complementar la información existente y poder favorecer una evaluación sobre la favorabilidad.

**2. DIVISION PROVISIONAL DE LAS MANIFESTACIONES URANIFERAS  
DEL GONDWANA OCCIDENTAL (Según la edad de las rocas huéspedes)**

*A) Conglomerados de cantos rodados de cuarzo y manifestaciones asociadas:  
1700–2500 millones de años*

- A–1. Witswatersrand – SUDAFRICA
- A–2. Jacobina – BRASIL
- A–3. Formación Moeda – (Gandarela, Gaivotas) – BRASIL
- A–4. Roraima – VENEZUELA – GUAYANA
- A–5. Mounana – GABON
- A–6. Santa Cruz (?) – BOLIVIA

*B) Manifestaciones de más de 500 millones de años (con exclusión de los conglomerados de cantos rodados de cuarzo y carbonatitas)*

- B–1. Itataia – (Na-metasomatismo, episienitas?) – BRASIL
- B–2. Lagoa Real (gneis albitico – tipo Na-metasomatismo?) – BRASIL
- B–3. Campos Belos (tipo relacionado con discordancia?) – BRASIL
- B–4. Shinkilobwe-Solwezi Dome – Nkana (metasedimentos con Cu – U en la Banda de Katanga) – ZAIRE – ZAMBIA
- B–5. Zona de Rössing (leucogranitos) – NAMIBIA
- B–6. Leré (diseminación en sienitas) – CHAD/CAMERUN (?)
- B–7. Niamtongon (diseminación en esquistos) – TOGO
- B–8. Espinharas, Seridó – (diseminación en granitos) – BRASIL

- C) *Manifestaciones en terrenos "Pre-Gondwana": 500–300 millones de años*
- C-1. Cuenca de Maranhao (asociación U-P en sedimentos marinos poco profundos) – BRASIL
  - C-2. Los Gigantes, La Estela (seudo entrecruzamiento de guías mineralizadas ("stockworks") en granitos) – ARGENTINA
  - C-3. Amarinópolis (areniscas mesodevónicas – tipo "roll") – BRASIL
- D) *Manifestaciones en terrenos del "Gondwana": 300–100 millones de años*
- D-1. "Santa Cruz" (tilitas) – BOLIVIA
  - D-2. San Gregorio – Formación Tres Islas (areniscas pérmicas) – URUGUAY
  - D-3. Figueiras (areniscas mesopérmicas/carbón) – BRASIL
  - D-4. Valle del Zambeze (areniscas del Karoo) – ZAMBIA – MALAWI – ZIMBAWE
  - D-5. Melange – ANGOLA
  - D-6. Skeleton Coast – NAMIBIA
  - D-7. Sierra Pintada (areniscas pérmicas) – ARGENTINA
  - D-8. Beaufort, Molteno (U en areniscas) – SUDAFRICA – LESOTHO
- E) *Sedimentos cretácicos (inclusive fosfatos)*
- E-1. Olinda (fosforitas del Cretácico superior) – BRASIL
  - E-2. Patos (fosfatos) – BRASIL
  - E-3. Cabinda (fosfatos) – ANGOLA – ZAIRE
  - E-4. Formación Neavay (fosfatos) – VENEZUELA
  - E-5. Tonco, Amblayo, Distrito Malargüe, Los Adobes, etc. (arenisca) – ARGENTINA
- F) *Sedimentos terciarios*
- F-1. Cosquín (fangolitas) – ARGENTINA
- G) *Intrusiones de carbonitas y alcalinas (todas las edades)*
- G-1. Poços de Caldas, Araxá, etc. – BRASIL
  - G-2. Cerro Corá – PARAGUAY
  - G-3. Altiplanicie Benguela (carbonitas) – ANGOLA
  - G-4. Phalaborwa, Tweerivier, Glenover – SUDAFRICA
  - G-5. Ondura Korume – NAMIBIA

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Grupo de trabajo convino en que hay excelentes perspectivas de cooperación entre los países del este de América del Sur y oeste de Africa en lo que se refiere a características geológicas comunes y modelos metalogenéticos similares.

Sería preciso realizar un esfuerzo concertado para reunir a los especialistas que trabajan en la exploración y evaluación del uranio, con objeto de definir claramente los modelos metalogenéticos de yacimientos de minerales de uranio que verosíblemente tienen áreas significativas en el Gondwana Occidental, anterior a la deriva de los dos continentes.

Se debería establecer una forma de cooperación entre los países interesados y se opina que tal iniciativa podría ponerse mejor en práctica bajo los auspicios del Organismo Internacional de Energía Atómica. En este sentido, el OIEA debería considerar la posibilidad de establecer un programa de investigaciones coordinadas.

Una forma de lograr esta finalidad sería que el Organismo invitara a diversos países a que faciliten expertos que trabajen en el Grupo. Se considera que el mandato del Grupo debería ser recopilar la información disponible relativa a todas las manifestaciones conocidas de uranio, según la clasificación convenida en la reunión del Grupo Asesor de Lima (Grupo de trabajo 2).

Se recomienda que el OIEA constituya un Grupo de trabajo con el fin de:

- a) Trazar un mapa metalogenético completo (o una serie de dos o cuatro mapas de ese tipo) del Gondwana Occidental anterior a la deriva continental, a la escala de 1:10<sup>7</sup>, indicando la ubicación de todos los yacimientos y manifestaciones significativos de uranio conocidos. El mapa solo debería mostrar las características geológicas y tectónicas más importantes.
- b) Hacer una breve relación de los yacimientos uraníferos conocidos del Gondwana Occidental, indicando la edad de la roca huésped, el proceso de mineralización y su edad, la mineralogía y la bibliografía pertinente.
- c) Seleccionar áreas favorables para la exploración de uranio y comunicar la información a todos los Estados Miembros del OIEA pertenecientes a la zona. Se recomienda asimismo que se de a los miembros del Grupo de trabajo la posibilidad de visitar las zonas de interés mutuo.
- d) Formular recomendaciones específicas para la prosecución de las exploraciones de uranio a lo largo de áreas preferenciales en ambos lados del Atlántico. Se deberían definir claramente las áreas preferenciales y las directrices de exploración.

#### *MIEMBROS QUE PARTICIPARON EN LA REUNION DEL GRUPO DE TRABAJO 2*

Premoli, C. (OIEA) ( <i>Presidente</i> )	Australia
Santos, R. Siegers, A.	Brasil
Barreto, P.M. (OIEA)	Viena
Velázquez, J.C.	Paraguay
Toens, P.O.	Sudáfrica
Preciozzi, F.L.	Uruguay
Pasquali, J.	Venezuela



## GEOLOGIA Y ESTRATIGRAFIA DEL URANIO EN AMERICA LATINA

### 1. OBJETIVOS

En Sudamérica existe poca información geológica sobre mineralización de uranio, rocas fértiles (fuentes), formaciones uraníferas, etc. En los últimos cuatro años se han encontrado yacimientos, mineralizaciones y anomalías en horizontes precámbricos, paleozoicos y mesozoicos. Aparentemente, algunos de estos horizontes podrían correlacionarse (ejemplo, Jurásico-Cretácico de la zona subandina de Bolivia, Perú, Ecuador y Colombia).

Los objetivos del Grupo son:

- La identificación de posibles provincias uraníferas en América del Sur, sus ambientes y mineralizaciones.
- Establecer las correlaciones geológicas y estratigráficas de la litología favorable a las manifestaciones uraníferas a lo largo de la Cordillera de Los Andes y otros.
- La identificación de problemas importantes, y acciones que serían necesarias para incrementar la información existente.

### 2. DELIMITACION PRELIMINAR DE UNIDADES GEOLOGICO-URANIFERAS DE AMERICA LATINA (Fig. 1)

Como un primer esquema tentativo es factible delimitar seis “unidades geológicas uraníferas”, que coinciden en general con los principales ambientes morfoestructurales de América Latina.

#### 2.1. Unidad “Escudo Guyano Brasileño”

Ambiente cratógeno estable con una superficie estimada de 10 000 000 de km<sup>2</sup>, de los que se han cubierto por prospección general un 15% aproximadamente.

En su ámbito existen importantes perspectivas de yacimientos de uranio bajo distintas condiciones de yacencia geológica, según detalle:

##### 2.1.1. *Basamento precámbrico*

Con similitudes geológicas a las de las “provincias uraníferas” del Canadá y Africa del Sur. En él se han ubicado yacimientos similares a los de esas “provincias” y se ha descubierto un nuevo modelo de yacencia, cuya importancia ratifica el interés del ambiente y crea nuevas perspectivas en los zócalos precámbricos del resto del mundo.

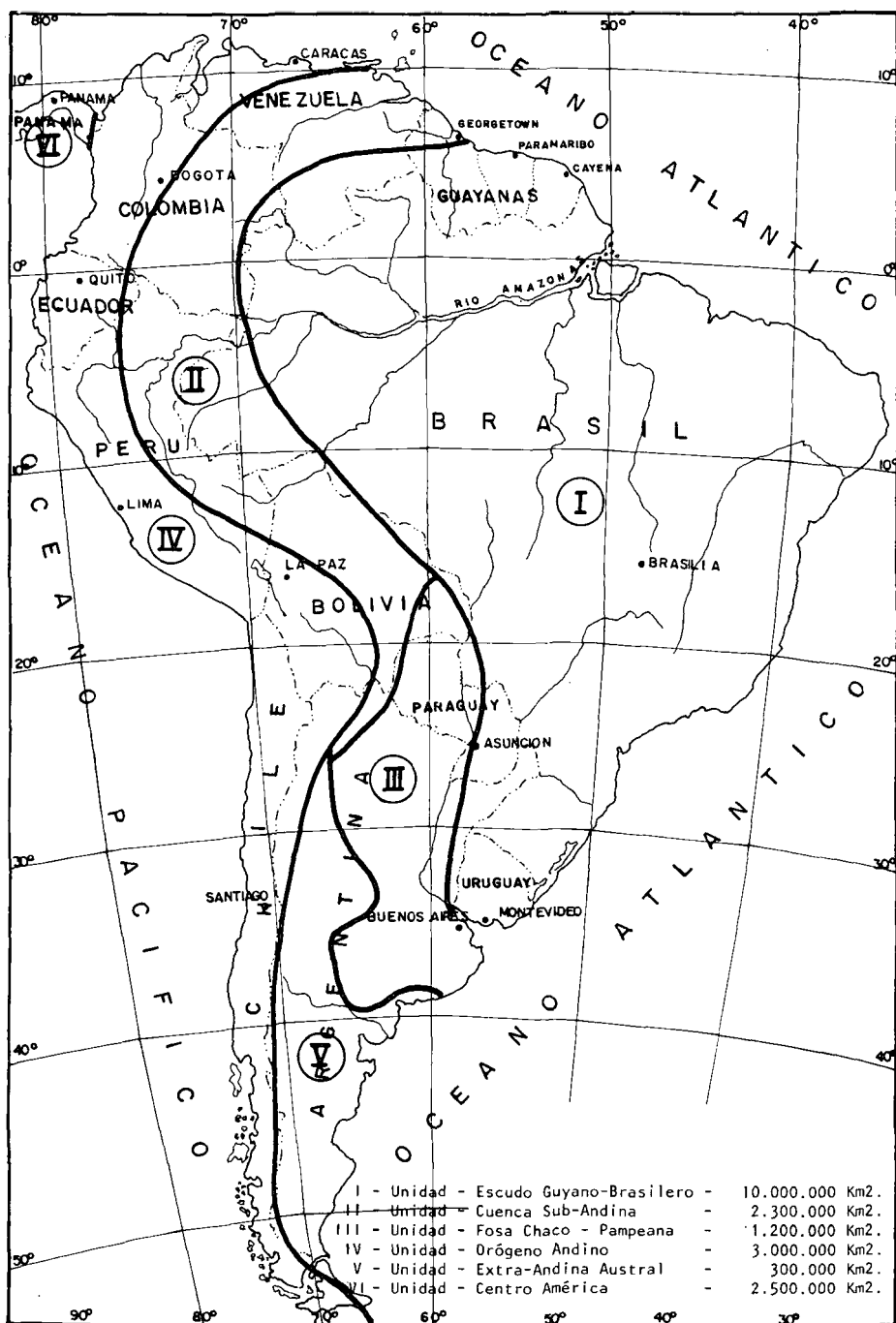


FIG.1. Delimitación preliminar de "Unidades geológico-uraníferas" en Sudamérica.

Los modelos metalogénicos conocidos hasta la fecha en este ambiente corresponden a:

- Uranio en “metaconglomerados piritosos”: (Proterozoico Inferior de 2200 a 2500 m.a.) en el Cuadrilátero Ferrífero, Sierra Jacobina, etc., Brasil.
- Uranio en “rocas feldespáticas porosas”: yacimiento Espinharas, Brasil (nuevo modelo, cuya yacencia inusual no es conocida en otros zócalos precámbricos mundiales).

### 2.1.2. “Cubiertas sedimentarias”

Secuencias de sedimentos continentales acumulados en las amplias cubetas de subsidencias intracratónicas del Paleo-Meso y Cenozoico.

Sus perspectivas uraníferas responden a la de los modelos de “uranio en areniscas”, con un encuadre favorable por las buenas condiciones geológicas de esas cubetas, como áreas estables de recepción y precipitación del ión uranilo, y existencia de fuentes de aporte fértiles en las secuencias precámbricas próximas.

Se conocen yacimientos de ese modelo en el Pérmico de Figueiras (Brasil), de C° Largo (Uruguay), etc.

### 2.1.3. Uranio en “rocas ígneas alcalinas”

Se vinculan al magmatismo cretácico que afecta al basamento precámbrico y a sus formaciones de cobertura.

Constituye un modelo de interés, presente en: Poço de Caldas, Agostinho, Cercado en el Brasil; y en un yacimiento del Paraguay.

## 2.2. Unidad “Cuenca Subandina Chaco-Paranaense”

Cubeta subsidente suave, de acumulación sedimentaria intracratónica meso-cenozoica, ubicada entre el Escudo Guyano-Brasileño y el orógeno móvil de Los Andes.

Evoluciona como faja elongada de unos 2 300 000 km<sup>2</sup>, afectada suavemente por la orogenia andina con una tectónica principal de plegamiento en estructuras de amplio radio y fallamiento en bloques.

Las exposiciones de los sedimentos meso-cenozoicos revelan sus condiciones de favorabilidad para la precipitación de uranio en modelos peneconcordantes, etc. Sus áreas de aporte corresponderían a un borde oriental fértil (basamento precámbrico) y un frente occidental (Orógeno Andino) cuya fertilidad es poco conocida.

Se han ubicado algunos indicios aislados en areniscas terciarias en Río Abujao (Perú); Pcia. de Salta (Argentina) etc.

Las condiciones geográficas climáticas tropicales podrían limitar las buenas perspectivas geológicas de este ambiente, aún muy poco prospectado.

### 2.3. Unidad "Fosa Chaco-Pampeana"

Area subsidente, entre el basamento precámbrico brasileño al este y el arco pampeano al oeste, de aproximadamente 1 200 000 km<sup>2</sup> de superficie.

Una cubierta cuaternaria enmascara y limita la eventual favorabilidad de las secuencias litoestratigráficas de su subsuelo. En sectores aislados del centro oeste de la unidad podrían darse expectativas de yacencia de modelos de uranio en "calcretes".

### 2.4. Unidad "Orógeno Andino"

Integra la cadena de Los Andes en una unidad de unos 3 000 000 km<sup>2</sup>, con máxima afectación orogénica que condiciona y limita la posible yacencia de algunos modelos metalogénicos de uranio.

En su cuadro geológico participan secuencias litoestratigráficas desde el Precámbrico al Cuaternario, desarrolladas en complejas estructuras de plegamientos y fallamientos.

Sus perspectivas de favorabilidad cubren una amplia gama de modelos, desde hábitos "filonianos", y de "dispersión" en plutonitas y vulcanitas, a los peneconcordantes, etc., en sedimentos continentales de las secuencias paleo-mesozoicas.

De todos ellos se conocen ejemplos:

- Hábito filoniano: Distritos Tocopilla, Tambillos, etc., en Chile; Vilcabamba, Colquijirca, etc., en Perú; La Urania, Bolsa Negra, Sevaruyo en Bolivia, etc., vinculados al magmatismo de orogenias diversas del Paleozoico al Cenozoico. De estos modelos, cuyo potencial hasta la fecha ha sido limitado, cabe destacar el de Sevaruyo en Bolivia con una yacencia poco usual en vulcanitas ácidas del Plioceno (ejemplos similares en México e Italia) cuyo interés puede ser extrapolado a ambientes similares de Latinoamérica y del mundo.
- Hábito sedimentario: Contrariamente a la estabilidad de la cubierta sedimentaria en el basamento precámbrico, las secuencias molásicas del Neopaleozoico, Meso y Cenozoico del Orógeno Andino, están afectadas por distintos ciclos orogénicos con una tectónica de máximos plegamientos y fallamientos, lo que limita los parámetros de sus favorabilidades geológicas para las yacencias en modelos peneconcordantes, etc.

La excepción a este esquema generalizado radicaría en algunas cubetas intermontanas terciarias.

Se conocen yacimientos en sedimentos terciarios del altiplano de Bolivia, en la formación Girón (Jurásico) y la formación Gualambay (Terciario) de Colombia.

## 2.5. Unidad "Extra-Andina Austral"

Con una superficie de 900 000 km<sup>2</sup> cubre el borde oeste de Argentina desde la base de Los Andes hasta el Arco pampeano y la costa atlántica patagónica en el este.

Presenta importantes condiciones de favorabilidad geológico-uraníferas a nivel de:

- Un "zócalo" eopaleozoico y eventualmente precámbrico (?): en partes metamórfico cristalino, con favorabilidad comprobada por la presencia de yacimientos en hábitos filonianos (sierra de Comechingones, Sañogasta, etc.) y "dispersión" (sierra Los Gigantes) etc.
- Una "cubierta sedimentaria": con secuencias molásicas permo-carbónicas, cretácicas y terciarias desarrolladas en geosinclinales, cubetas intracratónicas y cuencas intermontanas de buena estabilidad orogénica y condiciones de yacencia geológica, lo que le confiere una elevada favorabilidad uranífera.

Se conocen importantes yacimientos en modelos de uranio en areniscas sobre tres períodos metalogénicos principales: Neopaleozoico (distritos Sierra Pintada, Guandacol, etc.), Cretácico (distritos Malargue, Sierra Pichiñán, etc.) y Terciario (distrito Cosquín).

De esas épocas metalogénicas se conocen otros modelos, entre los que destacan los yacimientos en sedimentos marinos marginales de la cubeta cretácica del Andino (distritos El Tonco, Pampa Grande, etc.) en el norte Argentino con proyección hacia Bolivia y Perú.

Amplias cuencas centrípetas cuaternarias, con depósitos evaporíticos, salinas, etc., en clima árido, convalidan en esta unidad expectativas de eventual presencia de yacimientos tipo "calcrete".

## 2.6. Unidad "Centro América"

Existen muy pocos antecedentes uraníferos de este ambiente, para el que se presuponen válidas las consideraciones expuestas para el "Orógeno Andino".

Los yacimientos de uranio en las vulcanitas ácidas del Plioceno en México tienen similitud con el distrito Sevaruyo de Bolivia y ratifican parcialmente la apreciación anterior.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de los informes presentados en esta reunión y el intercambio de antecedentes y conocimientos de los integrantes de este Grupo de trabajo permitieron sacar las siguientes conclusiones:

- 1) *En América Latina se presentan condiciones geológicas favorables para la existencia de un importante potencial uranífero.*

Avala esta premisa el hecho de que en su ámbito existe una amplia gama de condiciones geológicas, desde zócalos estables a fajas orogénicas y secuencias litoestratigráficas desde el Precámbrico al Pleistoceno, que cubren la totalidad del cuadro geológico que controla la yacencia de los yacimientos de uranio conocidos en el resto del mundo.

Dentro de ese caleidoscopio geológico se han identificado ambientes con condiciones similares a los de ciertas provincias uraníferas mundiales, y en algunos de esos ambientes se conocen distritos con yacimientos cuyas reservas van desde algunos centenares hasta miles y decenas de miles de toneladas de uranio.

- 2) *Los ambientes con condiciones de favorabilidad geológico-uranífera se extienden sobre grandes superficies de centenares de miles y hasta millones de km<sup>2</sup>, de los cuales solo se han prospectado hasta la fecha una proporción mínima, probablemente inferior al 20%.*

La exploración de los distritos de uranio conocidos debe estimarse insuficiente si nos atenemos al número de sus yacimientos, a las reservas evaluadas hasta la fecha (en el orden superior a un centenar de miles de toneladas de uranio) y a los recursos presupuestarios afectados a sus desarrollos (un ejemplo lo daría el bajo metraje de sondeos ejecutados con ese fin, cifra estimada en poco más de un millón de metros).

- 3) *Los conocimientos resultantes de los planes de prospección, exploración de uranio en América Latina han quedado en general limitados a nivel de los países ejecutores de esos programas y salvo intentos aislados, no se han realizado extrapolaciones a ámbitos regionales que superen sus límites geográfico-políticos.*

Las dos últimas conclusiones reducen el logro de los objetivos asignados a este Grupo de trabajo que, bajo estas circunstancias, solo puede hacer un esbozo preliminar de delimitación de ambientes geológico-uraníferos en América del Sur y centrar sus consideraciones en la sugerencia de medidas que posibiliten ordenar e incrementar, en un programa de cooperación regional, el conocimiento de la "geología del uranio" en Latinoamérica.

En una de las conclusiones de este Grupo se destaca la falta de integración y extrapolación regional de los conocimientos que sobre la geología del uranio se han alcanzado en forma independiente en cada uno de los países de Latinoamérica. Esta circunstancia dificulta el conocimiento de la distribución y yacencia regional del uranio y la delimitación de sus provincias metalogénicas, lo que introduce un elevado riesgo en todo programa de prospección, cuando existen, como en este caso, enormes superficies por explorar.

Se destaca así la necesidad de integrar un Grupo de trabajo a nivel latinoamericano, donde se proceda a reunir, analizar y evaluar la totalidad de esos antecedentes, lo que permitirá conocer mejor la geología del uranio en América Latina y lograr una delimitación y clasificación geológicamente más adecuada de sus ambientes regionales.

De esta forma se logrará que los países puedan orientar los lineamientos técnicos y políticos más adecuados para el desarrollo de sus recursos de uranio y planificar sobre mejores fundamentos técnicos sus programas de prospección.

Se sugiere que el OIEA y la CIEN, que propiciaron la realización de esta importante reunión, apoyen esta iniciativa y que el Organismo derive parte de los recursos presupuestarios asignados por Asistencia Técnica a la prospección en los países de América Latina, para la creación de ese Grupo de trabajo.

### *MIEMBROS QUE PARTICIPARON EN LA REUNION DEL GRUPO DE TRABAJO 3*

Belluco, A.E. ( <i>Presidente</i> )	Argentina
Pardo, E. Virreira, V.	Bolivia
Pfeiffer, J. Rodríguez, H. Torres, J.A.	Colombia
Fluckiger, M. Martín, M. (OIEA)	Chile
Samson, P.A.	Francia
Ballhorn, R.K.	República Federal de Alemania
Goso, H.J.	Uruguay
Cárdena, H.J.	Venezuela



## **LIST OF PARTICIPANTS**

## **LISTA DE PARTICIPANTES**

### **ARGENTINA**

- Belluco, A.E.                      Comisión Nacional de Energía Atómica,  
Azopardo 313, Godoy,  
Cruz, Mendoza
- Rodrigo, F.                      Comisión Nacional de Energía Atómica,  
Av. Libertador 8250,  
1427 Buenos Aires

### **BOLIVIA**

- Aparicio, A.                      Comisión Boliviana de Energía Nuclear,  
Casilla 4821,  
La Paz
- Pardo, E.                      Comisión Boliviana de Energía Nuclear,  
Av. 6 de Agosto 2950,  
Casilla 4821,  
La Paz
- Virreira, V.                      Comisión Boliviana de Energía Nuclear,  
Av. 6 de Agosto 2905,  
Casilla 4821,  
La Paz

### **BRAZIL** **BRASIL**

- Ayres, J.G.                      NUCLEBRAS,  
Av. Santos Dumont 1221,  
Fortaleza
- Cordani, U.G.                      Centro de Investigaçao Geocronológicas,  
Universidade de São Paulo,  
Caixa Postal 20899,  
São Paulo

## LIST OF PARTICIPANTS

- Santos, R. NUCLEBRAS,  
Rua Gen. Polidoro 356,  
Rio de Janeiro
- Siegers, A. NUCLAM,  
Rua Almirante Salgado, 79 Laranjeiras,  
Rio de Janeiro
- da Vinha, C.A. NUCLEBRAS (DRM),  
Av. Santos Dumont 1221,  
Fortaleza

## CANADA

- Baird, J.G. Scintrex Ltd,  
222 Snidercroft Road,  
Concord, Ontario L4K 1B5
- Richardson, K.A. Department of Energy, Mines and Resources,  
601 Booth Street,  
Ottawa, Ontario K1A 0E8

## CHILE

- Garrido, P. Comisión Chilena de Energía Nuclear,  
Av. Salvador 943,  
Casilla 188-D,  
Santiago
- Flückiger, M.W. Comisión Chilena de Energía Nuclear,  
Casilla 188-D,  
Santiago
- Pérez, L.E. Comisión Chilena de Energía Nuclear,  
Casilla 188-D,  
Santiago
- Soto, R. Comisión Chilena de Energía Nuclear,  
Los Jesuitas 645,  
Casilla 188-D,  
Santiago
- Vieira, C. Chile ESSEX Minerals Co.,  
Miguel Claro 070, Dpto. 611,  
Santiago

## COLOMBIA

- Cortés, L.A. Instituto de Asuntos Nucleares,  
Av. El Dorado, Avenida 50,  
Apartado Aéreo 8595,  
Bogotá
- Fernández, J.A. ENUSA Colombia/España,  
Santiago Ruriñol 12,  
Madrid, España
- Mendoza, J.E. ENUSA Colombiana,  
Carrera 14 N° 88.31,  
Bogotá D.E.
- Pfeiffer, J. Instituto de Asuntos Nucleares,  
Av. El Dorado, Avenida 50,  
Bogotá
- Richard, F.E. Instituto de Asuntos Nucleares,  
Minatome Colombiana Ltda.,  
K 19 N° 89-36,  
Apartado Aéreo 90197,  
Bogotá 114
- Rodríguez, H. Instituto de Asuntos Nucleares,  
Av. El Dorado, Avenida 50,  
Apartado Aéreo 8595,  
Bogotá
- Torres, J.A. MINATOME Colombiana Ltda.,  
Apartado Aéreo 90197,  
Bogotá
- Vergara, E. ENUSA Colombiana,  
Carrera 14 N° 88.31,  
Bogotá D.E.

## COSTA RICA

- Castillo, R. Comisión de Energía Atómica de Costa Rica,  
Universidad de Costa Rica,  
San José

## ECUADOR

- Fiallos, V.S. Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica,  
Apartado Aéreo 2517,  
Quito

**ECUADOR (cont.)**

Peñaherrera, P.F.                      Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica,  
Cordero 779 y 6 de Diciembre,  
Quito

**FRANCE  
FRANCIA**

Bugelli, E.R.                              RHODIA S.A.,  
CP 1329 01000 São Paulo

Grimbert, A.                              Commissariat a l'énergie atomique,  
29.33 Rue de la Fédération,  
75752 Paris Cedex 15

Leutsch, Y.                                COGEMA – GAM 92,  
Av. de Montredon 13266,  
Marseille

Samson, P.A.                              MINATOME,  
69 Rue Dutot,  
75015 Paris

Tona, F.B.                                 COGEMA,  
92 Av. de Monttedai  
13008 Marseille

**GERMANY, FEDERAL REPUBLIC OF  
REPUBLICA FEDERAL DE ALEMANIA**

Ballhorn, R.K.                            Urangesellschaft mbH,  
Bleichstrasse 60–62, D-6000 Frankfurt/Main

Barthel, F.H.                            Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe,  
Stilleweg 2, D-3000 Hannover 51

Gattys, F.J.                                D-6078 Neu Isenburg, Frankfurt

Müller-Kahle, E.                        Uranerzbergbau GmbH,  
Kölnstrasse 367, Bonn

Zedlitz, F.C.                              Urangesellschaft mbH,  
Bleichstrasse 60–62, D-6000 Frankfurt/Main

**ITALY  
ITALIA**

Garelli, C. AGIP/SGEL,  
S. Donato, Milanese,  
Milano

Nicastro Guidiccioni, M. AGIP/SpA,  
S. Donato,  
Milano

**JAPAN  
JAPON**

Arai, K. Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp.,  
9-13, 1-Chome, Akasaka, Minatoku,  
Tokyo

Shibayama, H. Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp.,  
1-9-13 Akasaka, Minatoku,  
Tokyo

**PARAGUAY**

Druecker, M. Anschutz Minerals,  
Juan de Salazar 657,  
Casilla de Correo 1834,  
Asunción

Pearson, J. Anschutz Minerals,  
Juan de Salazar 657,  
Casilla de Correo 1834,  
Asunción

Velázquez, J.C. Comisión Nacional de Energía Atómica,  
Marisal Estigarribia Esq. Iturbe,  
Asunción

Wiens, F. Anschutz Minerals,  
Juan de Salazar 657,  
Casilla de Correo 1834,  
Asunción

**PERU**

- Arroyo, G. Instituto Peruano de Energía Nuclear,  
Av. Canadá, Cdra. 14 s/n.,  
Apartado 1687,  
Lima 13
- Cánepa, L. Instituto Peruano de Energía Nuclear,  
Av. Canadá, Cdra. 14 s/n.,  
Apartado 1687,  
Lima 13
- Rosado, F. Instituto Peruano de Energía Nuclear,  
Av. Canadá, Cdra. 14 s/n.,  
Apartado 1687,  
Lima 13
- Sosa, J. Instituto Peruano de Energía Nuclear,  
Av. Canadá, Cdra. 14 s/n.,  
Apartado 1687,  
Lima 13

**SOUTH AFRICA  
SUDAFRICA**

- Greathed, C. Southern Sphere Mining and Development Co.,  
P.O. Box 50065,  
Randburg, 2125
- Toens, P.D. Atomic Energy Board,  
P. Bag X256,  
Pretoria

**UNITED KINGDOM  
REINO UNIDO**

- Billings, A.J. Department of Energy,  
Hunting Geology and Geophysics Ltd,  
Elstree Way, Borehamwood, Herts.

**UNITED STATES OF AMERICA  
ESTADOS UNIDOS DE AMERICA**

- Curry, D.L. US Department of Energy,  
Grand Junction Office,  
P.O. Box 2567,  
Grand Junction, Colorado 81501

Foote, R.S.                      Geodata International Inc.,  
7035 John W. Carpenter Fwy,  
Dallas, Texas

Hasbrouck, J.C.                Geometrics Inc.,  
395 Java Drive,  
Sunnyvale, California

Huber, G.                      Colorado School of Mines,  
Golden, Colorado

Noble, E.A.                    US Geological Survey,  
National Center 915,  
Reston, Virginia

Parker, B.H., Jr.              US Department of Energy,  
Union Carbide Exploration Corp.,  
270 Park Avenue,  
New York, N.Y. 10017

Wright, R.J.                  US Department of Energy,  
Washington, DC 20545

**URUGUAY**

Goso, H.J.                      Comisión Nacional de Energía Atómica,  
Rincón 723 - P.3,  
Montevideo

Pérez, W.C.                    Comisión Nacional de Energía Atómica,  
Rincón 723, P.3,  
Montevideo

Preciozzi, F.L.                Instituto Geológico "Ingeniero Eduardo Terra Arocena",  
Depto. de Investigaciones Geológicas,  
Julio H. y Obes 1239,  
Montevideo

**VENEZUELA**

Audemard, F.E.                CONAN,  
Apartado Postal 68233,  
Caracas 106

Cárdenas, H.J.                CONAN,  
Apartado 68233,  
Caracas 106

**VENEZUELA (cont.)**

Pasquali, J.	CONAN, Apartado 68233, Caracas 106
--------------	--

**INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA)  
ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATOMICA (OIEA)**

Alegría, J.L.	Division of Technical Assistance, IAEA, Vienna
Barretto, P.M. (Scientific Secretary)	Division of Nuclear Power and Reactors, IAEA, Vienna
Basset, M.	Division of Technical Assistance, IAEA, Vienna
Martín, M.	Division of Technical Assistance, IAEA, Vienna
Moxham, R.L.	Division of Technical Assistance, IAEA, Vienna
Premoli, C.	Division of Technical Assistance, IAEA, Vienna
Smith, A.	Division of Technical Assistance, IAEA, Vienna
Tauchid, M.	Division of Technical Assistance, IAEA, Vienna
Taylor, J.	Division of Technical Assistance, IAEA, Vienna

## LIST OF PERUVIAN OBSERVERS

### LISTA DE OBSERVADORES PERUANOS

#### MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS

Milla, L.

#### UNIVERSIDAD CATOLICA

Aymar, J.

#### UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Mendivil, S.

Morales Serrano, G.

#### UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Cánepa, C.

Turnialán, H.

Ojeda, M.J.

#### INSTITUTO CIENTIFICO TECNOLOGICO MINERO

Herrera, F.

López Lavalle, M.

#### INSTITUTO GEOLOGICO MINERO

Caldas, J.

Miranda, C.

Cosío, A.

Morales Arnao, B.

Chacón, N.

Palacios, O.

De La Torre Valdivia, O.

Ponzoni, E.

Guevara, C.

Quintanilla, R.

Mamani, F.

Zelaya, A.

Mendoza, J.

## PETROLEOS DEL PERU

Azálgara, C.  
Chanove, G.  
Dávila, J.  
Gaviño, C.  
Morales, A.

Muñoz, H.  
Tejada, L.  
Vergara, C.  
Zegarra, C.  
Zegarra, J.

## BANCO MINERO

De Montreuil, L.

## INSTITUTO NACIONAL DE PLANIFICACION

Chang Ocoña, A.J.

## SCINTREX

Arce Helberg, J.

## MISION COOPERACION PERUANA-ALEMANA

Suárez De Freitas, A.

## MISION FRANCESA

Fornari, M.

Marocco, R.

## MITSUBISHI METAL CORPORATION

Suzuky, T.

Yoshida, M.

## MITSUI MINING

Neyra Zuzunaga, C.

## NYVA

Cuadros Ramos, A.  
Vásquez, L.

Zambrano Casahuamán, S.

## CENTRO MINERO DEL PERU

Escobar, J.  
Flores Pinedo, G.  
Niñas, L.  
Olortegui, P.

Núñez, W.  
Raygada, P.  
Ugarelli, P.

## MINERO — PERU

Castilla Barrios, F.

Guerrero Méndez, T.

## INSTITUTO PERUANO DE ENERGIA NUCLEAR

Alcántara, W.  
Antón, E.  
Arias de Zelada, C.  
Barreda, J.  
Caballero, W.  
Flórez, G.  
Gutiérrez, J.  
Herrera, W.

Lescano, G.  
Llamosas, W.  
Olave Rivas, C.  
Rogovich, C.  
Ruiz de Pardo, C.  
Torres de Medina, B.  
Valencia, J.  
Wong Nonato, M.



# HOW TO ORDER IAEA PUBLICATIONS

An exclusive sales agent for IAEA publications, to whom all orders and inquiries should be addressed, has been appointed in the following country:

UNITED STATES OF AMERICA UNIPUB, 345 Park Avenue South, New York, NY 10010

In the following countries IAEA publications may be purchased from the sales agents or booksellers listed or through your major local booksellers. Payment can be made in local currency or with UNESCO coupons.

ARGENTINA	Comisión Nacional de Energía Atómica, Avenida del Libertador 8250, RA-1429 Buenos Aires
AUSTRALIA	Hunter Publications, 58 A Gipps Street, Collingwood, Victoria 3066
BELGIUM	Service Courrier UNESCO, 202, Avenue du Roi, B-1060 Brussels
CZECHOSLOVAKIA	S.N.T.L., Spálená 51, CS-113 02 Prague 1
FRANCE	Alfa, Publishers, Hurbanovo námestie 6, CS-893 31 Bratislava
HUNGARY	Office International de Documentation et Librairie, 48, rue Gay-Lussac, F-75240 Paris Cedex 05
INDIA	Kultura, Hungarian Foreign Trading Company
ISRAEL	P.O. Box 149, H-1389 Budapest 62
ITALY	Oxford Book and Stationery Co., 17, Park Street, Calcutta-700 016
JAPAN	Oxford Book and Stationery Co., Scindia House, New Delhi-110 001
NETHERLANDS	Heiliger and Co., Ltd., Scientific and Medical Books, 3, Nathan Strauss Street, Jerusalem 94227
PAKISTAN	Libreria Scientifica, Dott. Lucio de Biasio "aeiou", Via Meravigli 16, I-20123 Milan
POLAND	Maruzen Company, Ltd., P.O. Box 5050, 100-31 Tokyo International
ROMANIA	Martinus Nijhoff B.V., Booksellers, Lange Voorhout 9-11, P.O. Box 269, NL-2501 The Hague
SOUTH AFRICA	Mirza Book Agency, 65, Shahrah Quaid-e-Azam, P.O. Box 729, Lahore 3
SPAIN	Ars Polona-Ruch, Centrala Handlu Zagranicznego, Krakowskie Przedmiescie 7, PL-00-068 Warsaw
SWEDEN	Ilexim, P.O. Box 136-137, Bucarest
UNITED KINGDOM	Van Schaik's Bookstore (Pty) Ltd., Libri Building, Church Street, P.O. Box 724, Pretoria 0001
U.S.S.R.	Diaz de Santos, Lagasca 95, Madrid-6
YUGOSLAVIA	Diaz de Santos, Balmes 417, Barcelona-6
	AB C.E. Fritzes Kungl. Hovbokhandel, Fredsgatan 2, P.O. Box 16356, S-103 27 Stockholm
	Her Majesty's Stationery Office, Agency Section PDIB, P.O. Box 569, London SE1 9NH
	Mezhdunarodnaya Kniga, Smolenskaya-Sennaya 32-34, Moscow G-200
	Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27, P.O. Box 36, YU-11001 Belgrade

Orders from countries where sales agents have not yet been appointed and requests for information should be addressed directly to:



Division of Publications  
International Atomic Energy Agency  
Wagramerstrasse 5, P.O. Box 100, A-1400 Vienna, Austria

81-00720





INTERNATIONAL  
ATOMIC ENERGY AGENCY  
VIENNA, 1981

ORGANISMO INTERNACIONAL  
DE ENERGIA ATOMICA  
VIENNA, 1981

SUBJECT GROUP: IV  
Chemistry, Geology and Raw Materials/Geology  
PRICE: Austrian Schillings 960,—

SUJETO: IV  
Química, geología y materias primas/Geología  
PRECIO: Chel. austr. 960,—